



Nuno Miguel Dias da Costa Malfeito

Licenciatura em Engenharia Civil

Equações de Previsão dos Movimentos Sísmicos à Superfície para a Região Autónoma dos Açores

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Ramo de Estruturas e Geotecnia

Orientador: Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho, LNEC
Co-orientador: Prof. Doutor João Paulo Bilé Serra, LNEC/FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão
Arguente: Prof^a. Doutora Maria Paula Pompeu de Miranda
Rodrigues de Teves Costa
Vogais: Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho
Prof. Doutor José Nuno Varandas



FAÇULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro 2015

Equações de Previsão dos Movimentos Sísmicos à Superfície para a Região Autónoma dos Açores

Copyright © Nuno Miguel Dias da Costa Malfeito, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização desta dissertação, intitulada *Equações de Previsão dos Movimentos Sísmicos à Superfície Para a Região Autónoma dos Açores*, resultou do trabalho desenvolvido pelo autor no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) inserido no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito da obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil e que só foi possível graças à contribuição de diversas pessoas e entidades a quem se exprimem os mais sinceros agradecimentos:

- Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), na pessoa do Investigador Carlos Alberto de Brito Pina, pela oportunidade, tempo e meios concedidos para a minha formação e para a realização deste trabalho.
- Ao Director do Departamento de Estruturas, Investigador José Manuel Rosado Catarino, agradeço de forma idêntica pela oportunidade, tempo e meios para a realização deste trabalho.
- Ao Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, Investigador Alfredo Peres de Noronha Campos Costa, pelo tempo e meios concedidos, pelos conhecimentos transmitidos e toda a ajuda prestada no âmbito do uso e desenvolvimento do simulador de cenários sísmicos.
- À Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho, orientadora deste trabalho no LNEC e amiga, pela sua sabedoria e partilha de conhecimentos, que em muito contribuíram para a minha formação científica, por todo o apoio e disponibilidade prestados ao longo de todo o trabalho e pela minha integração na instituição.
- Ao Investigador João Paulo Bilé Serra, co-orientador desta tese, no Departamento de Geotecnia do LNEC pelo apoio e conhecimentos transmitidos nas diversas matérias, em particular no desenvolvimento do capítulo 3.
- À Experimentadora Dra. Anabela Soares Marques Martins por todo o apoio e ajuda prestada no desenvolvimento de todas as rotinas que permitiram o capítulo 4.
- Ao Investigador Paulo Xavier Candeias, por toda a ajuda prestada no desenvolvimento das rotinas de cálculo, amizade e pela sua disponibilidade para a orientação do estágio profissional para a Ordem dos Engenheiros.
- A todas as restantes pessoas que fazem parte da equipa do NESDE por todo o apoio prestado e pela fácil integração da minha pessoa na equipa.

Agradeço ainda a colegas do NESDE que de forma directa ou indirecta contribuíram para o presente trabalho.

- Aos Investigadora Ema Coelho, Investigador António Correia, Investigadora Ana Marques e Engenheiro Nuno Afonso pela amizade e bom ambiente que proporciona o trabalho diário mais agradável.

Dirijo ainda uma palavra de agradecimento muito especial à minha família, em particular aos meus pais, irmão e à Catarina pelos sacrifícios, paciência e apoio prestado durante todo o percurso académico e no período do desenvolvimento deste trabalho.

E finalmente agradeço a todos os amigos e em particular ao Afonso, André, Inês, Mafalda e Tiago que de forma directa ou indirecta contribuíram para que este trabalho fosse uma realidade.

Resumo

Um dos principais problemas e interesses da engenharia sísmica prende-se com a previsão dos efeitos que eventos sísmicos futuros possam provocar à superfície do terreno de um dado local que permita o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação de efeitos assim como de estratégias que visem incrementar a resiliência da região em questão.

Esta previsão requer informação relativa quer a movimentos sísmicos ocorridos anteriormente quer ao solo existente no local a fim de se estabelecer uma relação entre as características de eventos e os deslocamentos verificados à superfície. Para a região Autónoma dos Açores ambos os conjuntos de informação disponível revelam-se em número insuficiente para que daí resulte uma análise adequada.

No sentido de contribuir para a resolução do problema apresentado, o presente trabalho recorre num primeiro momento à metodologia estatística para a elaboração de colunas de solo, com carácter sintético, que permitam a colmatação das lacunas existentes na base de dados da região.

Num segundo momento recorre-se ao modelo de propagação unidireccional de ondas de corte através de uma coluna de solo, como forma de avaliar os efeitos que um conjunto de acções sísmicas produzem no topo da coluna fazendo-se recurso do conjunto de colunas sintéticas, elaborado no presente trabalho, assim como da base de dados de acções sísmicas, de carácter sintético, existente para o afloramento rochoso no arquipélago dos Açores.

Da avaliação do modo de propagação de ondas sísmicas resulta um conjunto de espectros que servem de base à elaboração de equações de previsão dos movimentos sísmicos para os diferentes tipos de terreno da região.

Palavras-chave: Metodologia Estocástica, Perfis Estratigráficos Sintéticas, Propagação de Ondas Sísmicas, Sismo à Superfície, Equações de Previsão de Movimentos.

Abstract

One of the main problems and issues of earthquake engineering is the prediction of the effects at surface level caused by seismic events in order to provide valuable data that support decisions to mitigate seismic risk for one region.

These predictions require information relative to previous seismic records and information about the soil structure in order to establish a relation between the characteristics of a seismic event and the ground-motion observed at the surface.

For the region of Azores, neither the existing records nor the information about the soils are enough to develop a statistical analysis to the existing records. In order to solve the presented problem, the author adopts on a first instance statistic methods to modeling synthetic soil columns so that it could close gaps on the region data about the soil structure.

On a second instance, the study applies the one-dimensional shear wave propagation model through a soil column in order to evaluate how the energy is transmitted to the surface. For the analysis the synthetic soil columns generated previously are used, together with a group of synthetic seismic actions generated previously to this study by applying finite-fault methodologies.

From the seismic wave propagation analysis results a set of response spectra at the surface that are used to develop ground-motion prediction equations for the region of Azores.

Keywords: Stochastic Methodology, Synthetic Soil Columns, Seismic Waves Propagation, Seismic Effect at the Surface, Ground-Motion Prediction Equations.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Introdução e Enquadramento	1
1.2. Objectivos do Presente Trabalho	3
1.3. Estrutura da Dissertação	4
2. Metodologia Estocástica para Simulação de Eventos Sísmicos à Superfície	5
2.1. Introdução	5
2.2. Metodologia Estocástica para a Modelação de Eventos Sísmicos	6
2.2.1. Caracterização de processos estocásticos	7
2.2.2. Obtenção de espectros de potência a partir de um espectro de resposta	11
2.3. Avaliação da Resposta do Solo a Acções Cíclicas com Carácter Sísmico	13
2.3.1. Modelação das camadas de solo	14
2.3.2. Aplicação da propagação de ondas para avaliação dos deslocamentos do solo	15
2.3.3. Avaliação da resposta do solo a acções cíclicas de carácter sísmico	18
2.3.4. Modelo linear equivalente	20
2.3.5. Abordagem estocástica para a obtenção da resposta do solo	23
2.4. Comentários Finais	25
3. Modelação de Perfis Estratigráficos para o Arquipélago dos Açores	27
3.1. Introdução	27
3.2. Enquadramento Regional	28
3.3. Modelos de Perfis Estratigráficos para o Arquipélago dos Açores	30
3.3.1. Propriedades de materiais constituintes	31
3.3.2. Modelos de base de perfis estratigráficos	33
3.3.3. Hipóteses simplificativas a efectuar	35
3.3.4. Modelos representativos dos perfis estratigráficos de solo	36
3.4. Comparação com os Modelos Existentes	42
3.5. Geração de Perfis Estratigráficos Sintéticos	43
3.5.1. Metodologia para a geração dos perfis sintéticos	43
3.5.2. Aplicação da metodologia para a geração de colunas de solo sintéticas	44
3.6. Comentários Finais	44

4. Simulação de Movimentos Sísmicos Superficiais e Equações de Previsão de Movimentos.....	45
4.1. Introdução	45
4.2. Simulação de Movimentos Intensos à Superfície do Solo.....	47
4.3. Tratamento Estatístico da Base de Dados.....	49
4.3.1. Validação da metodologia para tratamento estatístico dos dados	50
4.4. Equações de Previsão dos Movimentos Intensos do Solo	51
4.4.1. Metodologia para estimativa dos coeficientes de atenuação	52
4.4.2. Resultados obtidos	53
4.4.3. Análise dos resultados obtidos.....	57
4.5. Comparação com Equações Existentes que Considerem o Comportamento Não Linear dos Solos	60
4.6. Aplicação dos Resultados Obtidos a um Registo Real.....	63
4.6.1. Evento sísmico considerado	64
4.6.2. Tipo de solo do local.....	64
4.6.3. Comparação espectral entre o registo e as estimativas obtidas pelas equações do presente estudo	65
4.7. Comentários Finais	67
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	69
5.1. Principais Conclusões	69
5.2. Desenvolvimentos Futuros.....	70
6. Bibliografia.....	73
 Anexos - A Calibração da Rotina de Cálculo Automático “Geradados”	 A1
 Anexos – B Comparação dos Espectros de Resposta Obtidos pela Aplicação das Equações de Boore e Atkinson (2006) com os Obtidos Através das Equações deste Estudo	 B1

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Fluxograma do projecto SiGMA - Caracterização da Acção Sísmica no Arquipélago dos Açores.....	2
Figura 2.1 - n realizações de um processo estocástico	6
Figura 2.2 - Exemplo de factorização de um processo não estacionário.	6
Figura 2.3 – Critérios de paragem, para o algoritmo de cálculo do espectro de potência.	11
Figura 2.4 – Esquema da Rotina Potência.	13
Figura 2.5 – Elemento infinitesimal sujeito a uma tensão de corte na direcção horizontal.	14
Figura 2.6 – Modelo do sólido de Kelvin-Voigt.	14
Figura 2.7 – Ciclo de histerese de uma camada, devido à aplicação de uma carga cíclica.	15
Figura 2.8 – Exemplo da decomposição de uma onda na fronteira.....	16
Figura 2.9 – Referencial espacial considerado.	18
Figura 2.10 – Exemplo de um ciclo de histerese de um solo.	20
Figura 2.11 – Curvas de degradação do módulo de corte, para tensão de confinamento de 10 kPa. .	21
Figura 2.12 – Curvas de evolução da energia dissipada, para tensão de confinamento de 10 kPa.....	21
Figura 2.13 – Exemplo de obtenção dos parâmetros G e ξ relativos à deformação γ_i	22
Figura 2.14 – Fluxograma da rotina de cálculo do espectro de resposta à superfície.	24
Figura 3.1– Enquadramento geotectónico dos Açores (<i>adaptado de</i> Forjaz, 1988).....	28
Figura 3.2– Classificação da actividade vulcânica proposta por Cas e Wright (1987).	29
Figura 3.3– Esquema de fases eruptivas e produtos correspondentes.	29
Figura 3.4– Modelos estratigráficos propostos por Malheiro e Nunes (2007)	33
Figura 3.5 – Modelos de perfis estratigráficos propostos por Teves-Costa e Veludo (2013)	34
Figura 3.6 – Modelos de perfis estratigráficos para a Região Autónoma dos Açores	37
Figura 3.7 a – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 1.....	39
Figura 4.1 – Fluxograma do funcionamento da rotina “Geradados”	48
Figura 4.2 – Truncatura do quantilho bilateral de 5% para uma distribuição Gaussiana.	50
Figura 4.3 – Espectros de resposta em aceleração para afloramento rochoso e para os seis tipos de perfil, considerando um cenário de magnitude $M_w = 4,1$ para as distâncias de 10, 50 e 100 km. ...	58
Figura 4.4 – Espectros de resposta em aceleração para afloramento rochoso e para os seis tipos de perfil, considerando um cenário de magnitude $M_w = 5,3$ para as distâncias de 10, 50 e 100 km.	58
Figura 4.5 – Espectros de resposta em aceleração para afloramento rochoso e para os seis tipos de perfil, considerando um cenário de magnitude $M_w = 6,5$ para as distâncias de 10, 50 e 100 km.	59
Figura 4.6 – Valores de aceleração espectral para magnitude $M_w = 5,3$ para os períodos de 0,3 s e 1 s.	60
Figura 4.7 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 5,3$, $R = 50$ km.	62
Figura 4.8 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento $M_w = 6,1$, $R = 113$ km e perfil do tipo 1).	65

Figura 4.9 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento $M_w = 6,1$, $R = 113$ km e perfil do tipo 2).	65
Figura 4.10 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento $M_w = 6,1$, $R = 113$ km e perfil do tipo 6).	66

Índice de Quadros

Quadro 3.1 – Propriedades de materiais geotécnicos dos perfis estratigráficos para o Arquipélago dos Açores	32
Quadro 3.2 – Propriedades do material que constitui o substrato rochoso para os perfis estratigráficos para o Arquipélago dos Açores	36
Quadro 3.3 – Número de estratos, espessuras mínimas, máximas e intervalos de valores de espessuras para cada estrato dos perfis	38
Quadro 3.4 – Coeficiente de variação para os diferentes materiais presentes nos solos	39
Quadro 4.1 – Conjunto de frequências para análise [Hz]	46
Quadro 4.2 – Caracterização estatística da Amostra, (perfil do tipo 2) antes e após remoção de outliers.....	50
Quadro 4.3 – Caracterização estatística da Amostra, (perfil do tipo 4) antes e após remoção de outliers.....	50
Quadro 4.4 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para afloramento rochoso.....	53
Quadro 4.5 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para o perfil tipo 1	54
Quadro 4.6 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para o perfil tipo 2	54
Quadro 4.7 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para o perfil tipo 3	55
Quadro 4.8 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para o perfil tipo 4	55
Quadro 4.9 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para o perfil tipo 5	56
Quadro 4.10 – Coeficientes da <i>EPMS</i> para o perfil tipo 6	56
Quadro 4.11 – Valores de V_{30} para os conjuntos de perfis de solo	61
Quadro 4.12 – Valores de G médio para os primeiros quatro estratos dos perfis de solo.....	64

1. Introdução

1.1. Introdução e Enquadramento

A actividade sísmica observada no Arquipélago dos Açores é consequência da sua localização numa zona tectonicamente activa e muito complexa. Apesar de a sismicidade ser caracterizada principalmente por sismos pequenos a moderados, o Arquipélago tem sofrido diversos sismos fortes causadores de mortes, danos e impactos económicos consideráveis. Justifica-se, assim, a importância de estudos de perigosidade sísmica, de avaliação de risco sísmico e de desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação para esta região.

Os estudos de perigosidade sísmica, que pretendem quantificar a exposição de determinado local a fenómenos naturais relacionados com a ocorrência dos sismos, podem seguir uma abordagem determinística, que consiste na elaboração de cenários relativos à ocorrência de eventos únicos considerados relevantes para o local em estudo ou uma abordagem probabilística que combina modelos para caracterizar as ocorrências e os efeitos dos sismos. Neste último caso, os resultados são expressos em termos da probabilidade de excedência de determinado nível de movimentos do solo, durante um determinado período de exposição.

Em ambas as abordagens, é fundamental a tradução do modo como a energia libertada na fonte sísmica se propaga na crosta terrestre e do movimento intenso do solo no local em análise. A tradução deste processo de propagação e o seu efeito no movimento superficial do solo é muitas vezes descrita por relações empíricas, equações de previsão de movimentos à superfície (*EPMS*), também conhecidas como leis de atenuação, obtidas através de análises estatísticas de conjuntos de registos de movimentos à superfície, de uma dada região. Estas equações, que relacionam a amplitude dos movimentos do solo com as características quer do evento sísmico quer por exemplo dos solos existentes, são descritas através de uma forma funcional do tipo:

$$\log Y = f(M, R, P) + \varepsilon \quad (1.1)$$

em que Y representa o valor da amplitude do movimento do solo, os parâmetros M (magnitude) e R (distância) são relativos à génese sísmica e o parâmetro P procura traduzir a influência de um outro factor que pode ou não estar relacionado com a fonte sísmica, como por exemplo o mecanismo de rotura ou o tipo de solo no local.

À forma funcional adoptada para a tradução dos movimentos encontra-se ainda associado um erro, relativo à diferença ocorrida entre os valores da função ajustada e os valores experimentais (registos reais). Este é contemplado através da introdução do parâmetro (ε) na expressão (1.1).

Relativamente aos registos que servem como base para a obtenção das equações de previsão, existem casos, como os Açores, onde embora a sismicidade da zona seja elevada, os registos disponíveis não são em número suficiente para possibilitar a elaboração de análises estatísticas e consequentes leis de atenuação, empíricas. Nestes casos, é possível recorrer-se a modelos sismológicos, localmente calibrados, para efectuar a simulação de eventos sísmicos, colmatando-se deste modo as lacunas existentes e permitindo uma análise do conjunto de dados gerados, com vista à obtenção das relações funcionais entre as características dos eventos e os movimentos do solo à superfície.

A região dos Açores constitui um caso bastante peculiar não só pela sua localização numa zona de forte dinâmica tectónica, que influencia bastante a sismicidade da região, mas também pela constituição geológica das ilhas, que resulta de diversos episódios vulcânicos. Existe por isso a necessidade de modelos fidedignos, com capacidade de caracterizar os movimentos intensos do solo, designadamente nos seus três processos elementares (de geração de energia na fonte sísmica, de propagação de energia sísmica e principalmente de alteração do conteúdo energético devido a efeitos do terreno mais superficial, os denominados efeitos sísmicos de sítio).

A necessidade da caracterização da acção sísmica para a região motivou a proposta de um projecto de investigação cujo objectivo é responder à problemática da sismicidade do arquipélago dos Açores (projecto SiGMA – Caracterização da Acção Sísmica no Arquipélago dos Açores) e cujo fluxograma de desenvolvimento se ilustra na Figura 1.1.

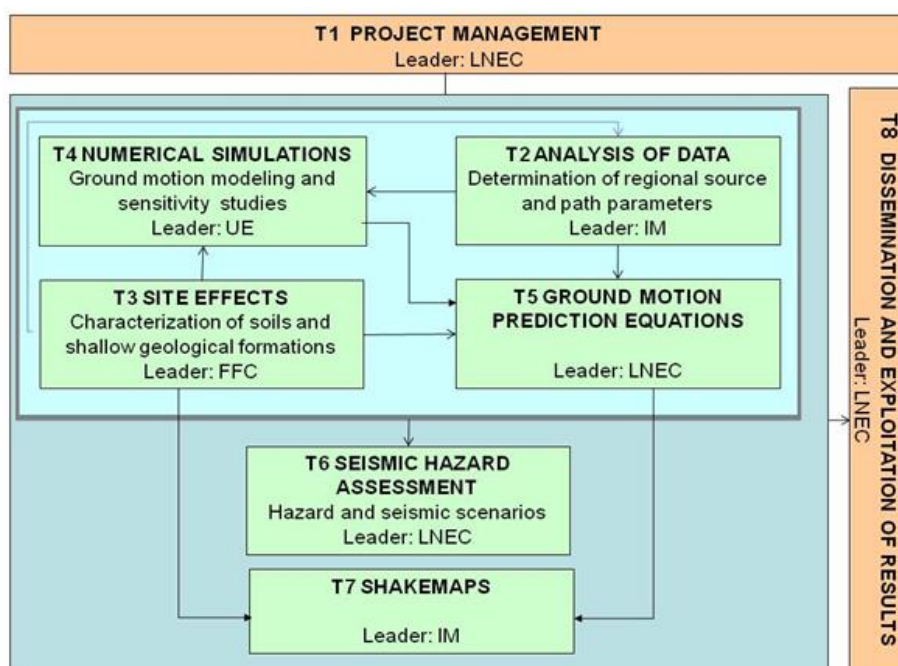


Figura 1.1 - Fluxograma do projecto SiGMA - Caracterização da Acção Sísmica no Arquipélago dos Açores.

Este é um projecto da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) com uma duração de 3 anos (Janeiro de 2012 a Janeiro de 2015), que tem como investigadora responsável a Doutora Alexandra Carvalho, do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (NESDE-LNEC), contando ainda com a participação de outras instituições: Fundação da Faculdade de Ciências – FFC/FC/UL; Instituto Português do Mar e da Atmosfera – IPMA; Universidade de Évora – EU e Universidade do Algarve - UAlg.

Para a caracterização da acção sísmica para o arquipélago dos Açores o projecto SiGMA contempla os seguintes objectivos principais:

- reunir, calibrar e interpretar a base de dados das redes acelerométrica e sísmica dos Açores e difundi-la pelos recentes portais internacionais de base de dados;
- caracterizar os movimentos fortes dos Açores, quer através da aplicação de modelos híbridos (baixas e altas frequências), quer através de equações de previsão dos movimentos (leis de atenuação), elementos chave para uma reavaliação da perigosidade sísmica nos Açores, para a determinação e caracterização de cenários sísmicos e estudos de risco sísmico nesta região;
- elaborar *Shakemaps*, para dar resposta em tempo real à comunidade científica e à protecção civil, aquando da ocorrência de um sismo.

Estes objectivos encontram-se enquadrados nos actuais interesses da comunidade internacional assim como nos interesses nacionais, dado que se procura dar resposta a um dos principais problemas e interesses da engenharia sísmica, que é a caracterização da acção sísmica envolvendo a estimativa da intensidade, do conteúdo em frequência, da duração e da variabilidade espacial dos movimentos intensos do solo.

As informações acerca da caracterização da acção sísmica, à superfície, poderão ser utilizadas posteriormente para efeitos de cálculo e dimensionamento, de estruturas de engenharia na região em questão.

No âmbito do projecto SiGMA, foram já obtidos os parâmetros regionais (Reis, 2014) que permitiram a caracterização da acção sísmica para o substrato rochoso, segundo uma abordagem estocástica (Carvalho, 2007), para o Arquipélago dos Açores e numa grelha de magnitudes e distâncias de interesse, colmatando assim as lacunas existentes.

A presente dissertação encontra-se enquadrada no projecto SiGMA e faz recurso da base de dados, entretanto elaborada, de espectros de aceleração em substrato rochoso e dos perfis estratigráficos sintéticos, aqui elaborados e apresentados.

Os dois conjuntos de informações serão posteriormente utilizados nas simulações de movimentos à superfície do terreno, de modo a que daí resulte uma base de dados, contendo registos sísmicos sintéticos, à superfície, que será posteriormente utilizada para a obtenção das equações de previsão de movimentos superficiais.

1.2. Objectivos do Presente Trabalho

Em zonas de grande actividade tectónica e consequentemente de grande sismicidade, à semelhança do Arquipélago dos Açores, a utilização das equações de previsão pretende contribuir para a diminuição da maior incerteza, sistémica, nos estudos de perigosidade e risco sísmico da região.

Estas equações só são possíveis de serem elaboradas se existir um vasto conjunto de registos de movimentos à superfície. Não existindo, estes podem ser simulados. Para tal, são necessários modelos que caracterizem a acção sísmica da região, assim como informação acerca da geologia referente às camadas mais superficiais dos terrenos.

Neste âmbito e dada a pouca informação existente na base de dados relativa quer a movimentos à superfície quer à estrutura e materiais dos solos da região dos Açores, torna-se necessário que se efectue a compilação de informação, de materiais e estrutura dos solos, de modo a colmatar as lacunas existentes nas bases de dados.

A base de dados de propriedades geotécnicas, recém-completada, é utilizada em conjunto com metodologias estocásticas para a elaboração de um conjunto de sequências estratigráficas, devidamente caracterizadas, que se desejam representativas dos solos da região.

A combinação do conjunto de sequências estratigráficas geradas, com a acção sísmica simulada para o substrato rochoso no âmbito do projecto SiGMA, tem como finalidade a simulação das alterações que ocorrem aquando da passagem de energia sísmica pelos terrenos, resultando uma base de dados de registos sintéticos de movimentos sísmicos à superfície.

A realização de análises estatísticas à base de dados de registos à superfície, permite obter os coeficientes que definem as equações de previsão de movimentos para os diferentes tipos de terrenos contemplados no estudo.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, tendo como iniciando-se com uma breve introdução ao tema abordado no estudo, assim como o enquadramento do mesmo no âmbito da engenharia sísmica e da engenharia de estruturas.

No capítulo 2, “Metodologia Estocástica para simulação de Eventos Sísmicos à Superfície”, faz-se uma breve introdução à metodologia estocástica assim como à teoria dos processos estocásticos, o seu modo de caracterização e a sua aplicabilidade para a modelação de acções sísmicas. O modo como se efectua a transformação da acção sísmica, tendo em conta a passagem desta através de uma coluna de solo, é também abordado neste capítulo e é posteriormente aplicado na simulação dos movimentos sísmicos à superfície do terreno.

No capítulo 3, “Modelação de Colunas de Solo para o Arquipélago dos Açores”, é efectuado o enquadramento geotectónico da região e é elaborada a base de dados relativa aos materiais existentes nos solos para permitir a geração de colunas de solo sintéticas. São ainda apresentados modelos de bases de colunas de solo, as suas demais propriedades e a metodologia idealizada que permitiu a geração de registos de perfis estratigráficos sintéticos, para a constituição de uma base de dados da estrutura dos solos existentes na região em análise.

No capítulo 4, “Simulação de Movimentos Sísmicos Superficiais e Equações de Previsão de Movimentos”, faz-se uso do modelo linear equivalente para a obtenção da resposta sísmica das colunas de solo recorrendo-se para tal ao conjunto de colunas sintéticas, elaborado neste estudo, e ao conjunto de acções sísmicas simuladas no âmbito do projecto SiGMA para um meio elástico semi-infinito de rigidez superior (substrato rochoso) sobre o qual assentam os perfis.

Os resultados das simulações à superfície são sujeitos a tratamento estatístico, cuja finalidade é a redução da dispersão dos resultados e a obtenção dos coeficientes que permitem a definição das equações de previsão dos movimentos de solo. É posteriormente efectuada uma avaliação à qualidade dos valores estimados, assim como o estudo da sua sensibilidade a parâmetros como distância hipocentral ou magnitude do evento.

A presente dissertação termina com o capítulo 5, “Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros”, no qual se efectua uma síntese do trabalho efectuado, referindo-se as principais conclusões e propondo-se algumas linhas para a realização de futuros desenvolvimentos sobre o tema.

2. Metodologia Estocástica para Simulação de Eventos Sísmicos à Superfície

2.1. Introdução

O recurso à estatística tem sido frequente em diversas áreas científicas para a modelação de fenómenos cujos valores não evidenciem uma relação algébrica entre si, restando apenas a estimativa de uma relação estatística a partir das observações do conjunto.

Na modelação destes fenómenos é geralmente empregue a teoria dos processos estocásticos, a qual contempla diversas variações de um mesmo evento, caracterizando-o de acordo com os valores que apresentam uma maior probabilidade de ocorrência.

Como exemplo de um processo estocástico tem-se uma sequência de registos sísmicos, efectuados num local, e provenientes da mesma fonte. Todos os registos são diferentes resultando de causas não controladas pelo observador. Sem ser do ponto de vista estatístico, não existe qualquer previsibilidade nas características do fenómeno.

A metodologia de base estocástica é de extrema utilidade para a engenharia sísmica, onde os principais problemas colocados são a modelação de eventos sísmicos e estimativa dos movimentos intensos, do solo, capazes de afectar pessoas e estruturas.

A modelação de eventos sísmicos é efectuada com recurso a modelos estocásticos que contemplam uma série de variações de um dado evento, sendo de um modo geral calibrados para cada região, de modo a caracterizar-se a sismicidade local.

Porém, a simulação de movimentos à superfície é naturalmente complexa, uma vez que envolve não só o modo como a energia é libertada, a caracterização da fonte sísmica, e o meio de propagação até ao substrato rochoso (fronteira na crosta terrestre entre os materiais rochosos e os materiais resultantes da sua transformação geológica), mas também a influência do comportamento não linear das camadas mais superficiais do terreno sobre a propagação da energia até à superfície.

Para a avaliação dos movimentos à superfície, são geralmente utilizados modelos que relacionam esses movimentos com o tipo de ondas sísmicas (quer as emitidas na fonte sísmica, quer as entretanto geradas na propagação), contemplando a dependência do modo de propagação com as propriedades dos materiais atravessados, eventualmente conducentes a comportamento não linear.

Embora não esteja no âmbito da presente dissertação uma explicação da teoria dos processos estocásticos, foi entendido que uma breve introdução à mesma assim como a apresentação de algumas das expressões essenciais, mais vocacionadas para a aplicação em engenharia sísmica, fornecerá ao leitor uma melhor percepção acerca do tema, que poderá ser aprofundado em referências diversas como Cunha (1990) e Solnés (1997).

2.2. Metodologia Estocástica para a Modelação de Eventos Sísmicos

A metodologia de base estocástica recorre aos designados processos estocásticos como forma de simular n realizações, de um dado evento sísmico, representando-se cada realização por uma sequência de valores $(x_i(t); i = 1, n)$, Figura 2.1, independente das demais, mas pertencente ao processo, $X(t)$, que pode ser traduzido através da expressão (2.1).

$$X(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t)\} \quad (2.1)$$

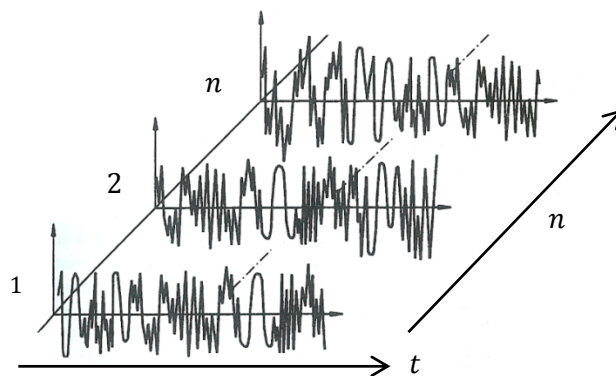


Figura 2.1 - n realizações de um processo estocástico
(adaptado de Solnés, 1997)

Uma classe de processos estocásticos importante para a engenharia sísmica é a classe dos processos estocásticos estacionários, caracterizados por as suas propriedades estatísticas serem invariáveis no tempo.

Embora os fenómenos a modelar não se possam traduzir por um processo estacionário, é corrente a sua modelação ser realizada recorrendo-se a este tipo de processo, dada a maior facilidade de caracterização.

De modo a transformar um processo estacionário, $H(t)$, num não estacionário, $NH(x, t)$, que traduza o fenómeno, recorre-se a uma função modeladora, $A(t)$, depende da variável t , ilustrando-se com o exemplo da Figura 2.2.

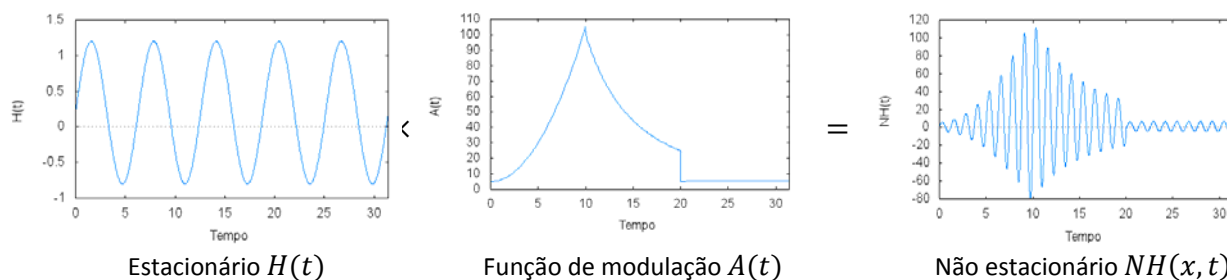


Figura 2.2 - Exemplo de factorização de um processo não estacionário.

Assim sendo, a apresentação dos processos estocásticos será efectuada apenas para processos estacionários.

Dentro dos processos estocásticos estacionários tem-se os designados processos ergódicos, nos quais a média temporal de uma sequência, é igual à média instantânea de todas as sequências em qualquer instante (Solnés, 1997).

2.2.1. Caracterização de processos estocásticos

A caracterização dos processos estocásticos engloba o conhecimento de toda a estrutura probabilística do processo, não só em termos do parâmetro n mas também da variável t .

Considerando o evento sísmico como um processo estocástico, $X(t)$, para um dado instante o valor da aceleração tem uma certa probabilidade de ocorrência, que pode ser calculada por integração da função densidade de probabilidade.

A probabilidade de num conjunto o valor do processo, num dado instante aleatório, ser inferior a um dado valor α é obtida com o recurso à função de probabilidade acumulada segundo a expressão (2.2 a), no caso de se tratar de uma variável continua (quantidade de valores indefinida e portanto não numeráveis), ou em alternativa pela expressão (2.2 b) para o caso se se tratar de um conjunto de valores finito e numerável.

$$F(\alpha) = P(X < \alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} p(x) dx < 1 \quad (2.2 a)$$

$$F(\alpha) = \sum_{x_i < \alpha} p(x_i) \quad (2.2 b)$$

Deste modo, é necessário o conhecimento de todas as funções de densidade de probabilidade (2.3), tendo em conta todas as sequências (variações do evento), cuja definição é escrita segundo a expressão (Cunha 1990):

$$p_n(x) = p(x_1(t), \dots, x_n(t)) \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

e que permite calcular a probabilidade do evento se situar numa célula infinitesimal, centrada em x de acordo com a expressão (2.4):

$$P(x_1(t) < x(t) < x_1(t) + dx_1, \dots, x_n(t) < x(t) < x_n(t) + dx_n) = p(x_1(t), \dots, x_n(t)) dx_1 \dots dx_n \quad (2.4)$$

em que x_1, \dots, x_n são as n realizações possíveis do evento representado por $x(t)$.

No caso de se pretender uma análise expedita, às características do processo, é possível recorrer-se a um conjunto de parâmetros tais como valor médio (2.5 a), valor quadrático médio (2.5 b), e variância (2.5 c).

$$\mu_x = E[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x(t)) dx \quad (2.5 a)$$

$$E[X^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x(t)) dx \quad (2.5 b)$$

$$\sigma^2 = E[(x(t) - \mu_x)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - \mu_x]^2 p(x(t)) dx \quad (2.5 c)$$

Uma grandeza bastante útil na caracterização de um processo estocástico é a função de auto-correlação, $R_x(x(t_i), x(t_j))$, uma função de segundo grau que permite descrever o modo evolutivo do processo entre dois instantes, $\{x(t_i) \cdot x(t_j)\}$, de acordo com expressão (2.6):

$$R_x(x(t), x(t_j)) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t_i) \cdot x(t_j) \cdot p(x(t_i), x(t_j)) dx(t_i) dx(t_j) \quad (2.6)$$

em que τ é o desfasamento entre dois instantes (t_j, t_i), obtido pela expressão (2.7).

$$\tau = t_j - t_i \quad (2.7)$$

A função de auto-correlação, entre dois instantes, pode então ser descrita em função do desfasamento, τ , (2.8).

$$R_x(\tau) = R_x(x(t), x(t + \tau)) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot p(x(t), x(t + \tau)) dx(t) dx(t + \tau) \quad (2.8)$$

Para processos estacionários tem-se ainda que:

$$R_x(0) = E[x(t), x(t)] = E[X^2(t)] = \sigma^2 - \mu^2 \quad (2.9)$$

em que μ e σ^2 representam, respectivamente, a média e a variância do processo para o instante t , sendo que se $\mu = 0$ então $R_x(0) = \sigma^2$.

A função de auto-correlação contém toda a informação estatística relevante sobre o processo e pode ainda ser relacionada com a função de densidade de potência, $S_x(\omega)$, outra função de segunda ordem, de acordo com a expressão (2.10). A função de densidade de potência não é mais que a transformada de Fourier da função de auto-correlação do processo.

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega(\tau)} d\tau \quad (2.10)$$

Esta função pode ainda ser obtida através do cálculo do valor esperado da transformada de Fourier, do processo estocástico $X(t)$, expressão (2.11), no intervalo de integração $[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}]$, sendo assim obtida a densidade espectral de potência para a frequência ω da série de Fourier,

$$S_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E \left\{ \left| \int_{-T/2}^{T/2} X(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \right\}}{2\pi T} \quad (2.11)$$

em que T é a duração do intervalo $[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}]$, para o qual é necessário restringir o processo $X(t)$ de modo a que este possa ser representado como série de Fourier nesse intervalo. Considerando $T \rightarrow \infty$, o processo é integrável em \mathbb{R} , sendo que tal implica que o integral do processo em \mathbb{R} possa ser aproximado pelo integral calculado para o intervalo $[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}]$, desde que T seja suficientemente grande.

A obtenção dos valores de densidade espectral de potência para cada frequência, pertencente a um vector de frequências, $\underline{\omega}$, permite definir a função de densidade espectral do processo, $S_x(\underline{\omega})$, também geralmente designada como espectro de potência, e que caracteriza o processo estocástico $X(t)$.

Esta função poderá também ser utilizada para a obtenção dos momentos espectrais de ordem r , através da aplicação da expressão (2.12), recorrendo-se a estes para o cálculo dos parâmetros de caracterização do processo

$$\lambda_r(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^r S_x(\omega) d\omega \quad (2.12)$$

sendo ω a frequência para a qual se calcula o momento estatístico e $S_x(\omega)$ o valor do espectro de potência na frequência ω .

Dado que o processo estocástico inclui várias realizações, o valor máximo para um dado instante pode não pertencer à mesma sequência de valores que o valor máximo do instante seguinte. O cálculo dos valores máximos efectua-se considerando um intervalo temporal Δt e avaliando qual o valor máximo com maior probabilidade de ocorrência nesse mesmo intervalo. Tendo-se como exemplo um processo gaussiano, o valor desejado será o valor médio dos valores máximos que ocorrem no intervalo considerado.

Para o cálculo do valor médio dos máximos, para um intervalo Δt , utiliza-se a expressão (2.13), obtida por Vanmarke (1976), recorrendo-se aos momentos espectrais para a obtenção dos valores pretendidos, através do espectro de potência,

$$E[Max X(t)|\Delta t] = \left[\sqrt{2 \ln(2f_e^\uparrow \Delta t)} + \frac{0,577216}{\sqrt{2 \ln(2f_e^\uparrow \Delta t)}} \right] \sigma_{rms} \quad (2.13)$$

com

$$\sigma_{rms} = \sqrt{\frac{\lambda_0 \cdot (f)}{\Delta t}} \quad (2.14)$$

$$f_e^\uparrow = \begin{cases} (1,63 \delta^{0,45} - 0,38)f_0 & , \delta < 0,69 \\ f_0 & , \delta > 0,69 \end{cases} \quad (2.15)$$

em que f_e^\uparrow , conforme expressão (2.15), representa a frequência média de passagens ascendentes, e estatisticamente independentes, do processo pelo valor nulo, Δt é o intervalo temporal no qual se pretende a obtenção do valor médio dos máximos, λ_0 , λ_1 e λ_2 são os momentos espectrais de ordem 0 e 2, obtidos através da expressão (2.12), e f_0 é a frequência média, de passagens ascendentes, pelo valor nulo, obtida pela expressão (2.16) (Cunha, 1990),

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (2.16)$$

em que δ representa a largura de banda, obtida pela expressão (2.17).

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \quad (2.17)$$

σ_{rms} , calculado de acordo com a expressão (2.14), representa o desvio padrão.

O conjunto dos valores calculados para a totalidade de intervalos, em que se dividiu o intervalo temporal de observação, contemplados no processo, permite calcular, por aplicação da expressão (2.13), os valores médios dos máximos para a totalidade do processo $X(t)$.

Para o caso em que o espectro de potência, $S_x(\omega)$, caracteriza uma acção sísmica, este pode ser utilizado para a obtenção da resposta de um oscilador linear de 1 grau de liberdade (1GDL), que por sua vez se encontra caracterizado por uma frequência própria, ω_n , e uma fracção de amortecimento crítico, ξ .

A obtenção do designado espectro de potência da resposta, $S_R(\omega, \omega_n, \xi)$, é efectuada com a multiplicação do espectro de potência da acção, $S_A(\omega)$, pela função de transferência, $H(\omega, \omega_n, \xi)$ entre a excitação harmónica e a resposta induzida, de acordo com a expressão (2.18).

$$S_R(\omega, \omega_n, \xi) = |H(\omega, \omega_n, \xi)|^2 S_A(\omega) \quad (2.18)$$

No caso do oscilador linear de um grau de liberdade, modelo essencial para a definição de um espectro de resposta, a função de transferência é uma função complexa obtida para cada uma das frequências do vector de discretização $\underline{\omega}$ através da manipulação da equação de equilíbrio dinâmico para vibrações forçadas (2.19),

$$m \ddot{q}(t) + c \dot{q}(t) + k q(t) = p(t) \quad (2.19)$$

em que m representa a massa do oscilador, c a constante de amortecimento viscoso e k a constante de rigidez do sistema. $q(t)$ e $p(t)$ correspondem respectivamente à resposta do oscilador e à excitação imposta. Esta ultima pode ser expressa em função da aceleração do terreno, $\ddot{u}_g(t)$, de acordo com a expressão (2.23).

$$p(t) = m \ddot{u}_g(t) \quad (2.20)$$

Da aplicação da transformada de Fourier aos processos $q(t)$ e $p(t)$, restringindo o intervalo de integração a $[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}]$, com $T \rightarrow \infty$, e tendo-se em conta que $\dot{Q}(\omega) = \omega \cdot Q(\omega)$, resulta a expressão (2.21),

$$(-m \omega^2 + i c \omega + k)Q(\omega) = P(\omega) \Leftrightarrow (-m \omega^2 + i c \omega + k)Q(\omega) = m \ddot{U}_g(\omega) \quad (2.21)$$

na qual ω é a frequência da excitação.

A resposta harmónica do oscilador $Q(\omega)$ é expressa de acordo com a fórmula (2.22), em que se multiplica a acção $P(\omega)$ pela função de transferência $H(\omega, \omega_n, \xi)$.

$$Q(\omega) = \frac{1}{(-m \omega^2 + i c \omega + k)} P(\omega) = H(\omega, \omega_n, \xi) P(\omega) \quad (2.22)$$

A função de transferência excitação-deslocamento relativo pode ainda ser simplificada obtendo-se a expressão (2.23).

$$H(\omega, \omega_n, \xi) = \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = \frac{Q(\omega)}{m \ddot{U}_g(\omega)} = \frac{1}{m (\omega_n^2 - \omega^2 + 2 i \xi \omega_n \omega)} \quad (2.23)$$

Fixando-se o valor Δt e fazendo-se variar a frequência natural ω_n , para um determinado valor de ξ , o correspondente valor do espectro de resposta pode ser obtido através da expressão (2.13) a qual adquire a forma (2.24):

$$RD(\Delta t, \omega, \omega_n, \xi) = \left[\sqrt{2 \ln(2 f_e^\uparrow \Delta t)} + \frac{0,577216}{\sqrt{2 \ln(2 f_e^\uparrow \Delta t)}} \right] \sigma_{rms} \quad (2.24)$$

2.2.2. Obtenção de espectros de potência a partir de um espectro de resposta

A alteração da acção sísmica, ocorrida aquando a passagem desta por um meio estratificado, é realizada com a alteração do espectro de potência, da acção, pela aplicação da função de transferência correspondente.

Para casos em que as acções sísmicas, em afloramento rochoso, sejam representadas por espectros de resposta de um oscilador, localizado nesse mesmo estrato, torna-se necessária a obtenção do espectro de potência que caracteriza a acção e que origina esse mesmo espectro de resposta.

Embora a obtenção do espectro de resposta através do espectro de potência da resposta seja efectuada de uma forma relativamente directa, com a aplicação da expressão (2.24) e considerando-se um intervalo Δt para a ocorrência dos valores máximos, o inverso deixa de ser um simples cálculo algébrico, tornando-se um processo não expedito, que envolve sucessivas iterações, com vista à obtenção do espectro de potência respectivo.

O processo iterativo para a obtenção do espectro de potência, a partir de um espectro de resposta, tem início com a introdução do espectro de resposta, em deslocamento relativo, seguindo-se uma consideração de um espectro de potência simples, S_0 , aplicando-se de seguida o algoritmo para o cálculo iterativo.

No processo iterativo é fundamental estabelecer-se critérios de paragem, pois caso contrário o processo continuaria até serem esgotados os recursos computacionais, nunca devolvendo um resultado. Neste âmbito foram estabelecidos como critérios o valor do erro máximo cometido e o número máximo de iterações, apresentados na Figura 2.3, tendo-se considerado que após atingir um dos limites o processo converge e o erro associado, cf. equação (2.28), é mínimo.

$$\text{Critérios de paragem} \begin{cases} \text{Erro máximo cometido} & = 0,006 \\ \text{Número máximo iterações} & = 100 \end{cases}$$

Figura 2.3 – Critérios de paragem, para o algoritmo de cálculo do espectro de potência.

O funcionamento do algoritmo efectua-se considerando o espectro de potência sugerido, $S_{iter\ 0}$, e calculando o correspondente espectro de resposta de um oscilador linear 1GDL com uma dada fracção de amortecimento critico, ξ , e para uma duração, Δt , através da aplicação da expressão (2.24). De seguida este é comparado com o espectro de resposta, do qual se pretende a obtenção do espectro de potência, permitindo avaliar o erro máximo cometido, calculando o erro em cada um dos períodos contemplados, através da expressão (2.25), fazendo sucessivamente a comparação de forma a devolver o valor máximo,

$$Erro(T) = \frac{RSD_{calculado}(T) - RSD_{inserido}(T)}{RSD_{inserido}(T)} \times 100 \quad (2.25)$$

em que T é agora o período para o qual se efectua a comparação, $RSD_{calculado}$ a ordenada espectral obtida a partir do espectro de potência $S_{iter\ 0}$, e $RSD_{inserido}$ o espectro de resposta para o qual se pretende obter o espectro de potência.

Caso não se tenha atingido nenhum dos critérios de paragem estabelecidos, o algoritmo volta a efectuar novo cálculo, definindo o novo espectro de potência, em cada frequência, como resultado da multiplicação do espectro anterior com a razão entre espectros de resposta, de acordo com a expressão (2.26),

$$S_{iter\ i+1}(\omega) = \left(\frac{RSD_{calculado}(T)}{RSD_{inserido}(T)} \right)^2 S_{iter\ i}(\omega) \quad (2.26)$$

em que $S_{iter\ i+1}(\omega)$ é o valor do espectro de potência, a considerar na iteração seguinte, e $S_{iter\ i}(\omega)$ o valor do espectro de potência da iteração realizada, ambos para a frequência ω .

Uma vez atingido um dos critérios de paragem o algoritmo termina, devolvendo o espectro de potência correspondente ao espectro de resposta inserido, considerando-se que a convergência foi atingida.

Este processo será utilizado, na presente dissertação, para a obtenção dos espectros de potência das acções sísmicas, contempladas na base de dados em afloramento rochoso e que se encontram representadas por espectros de resposta em aceleração, para um oscilador localizado neste estrato.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do algoritmo utilizado para o cálculo de espectro de potência, a partir de um espectro de resposta, é apresentado na Figura 2.4 um esquema da rotina utilizada neste trabalho, Rotina Potência, a qual constitui uma adaptação da rotina existente no simulador de cenários sísmicos LNECloss (Campos Costa *et al.*, 2004).

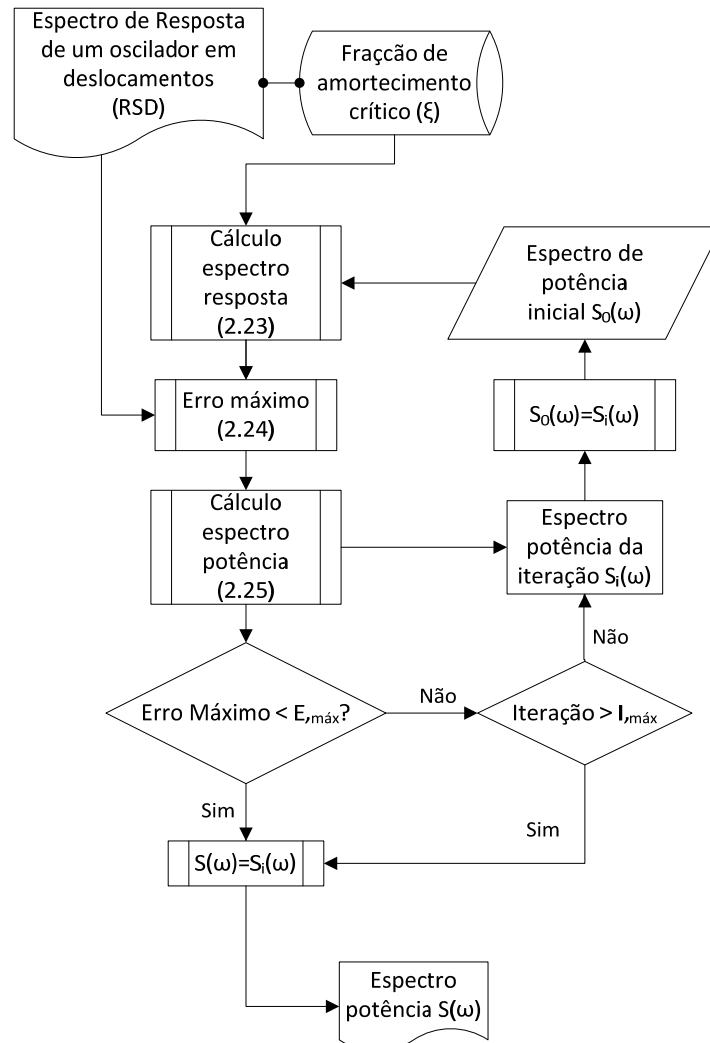


Figura 2.4 – Esquema da Rotina Potência.

2.3. Avaliação da Resposta do Solo a Acções Cíclicas com Carácter Sísmico

A avaliação da resposta superficial em zonas onde o firme rochoso não é aflorante, isto é, caso se encontre sob um depósito ou maciço terroso, constituído por camadas sobrepostas de solos diversos, representa um dos principais problemas colocados à engenharia sísmica.

Se na engenharia de estruturas reticuladas, se tem que estas podem ser discretizadas por um conjunto de elementos estruturais, que concentram a rigidez estrutural, e de massas concentradas, tal não ocorre na engenharia sísmica geotécnica. A impossibilidade de utilizar este tipo de discretização ao solo advém da natureza contínua do meio em causa, sendo necessário que o solo seja considerado como meio contínuo e a avaliação da resposta, sísmica, efectuada com base na propagação de ondas sísmicas.

2.3.1. Modelação das camadas de solo

A modelação do solo é, em geral, efectuada considerando-o como um sólido Kelvin-Voigt, para efeitos de avaliação da propagação visco-elástica da deformação. Nestes modelos, a resistência ao corte dos respectivos materiais, é obtida pela soma de uma parcela elástica com uma viscosa, de acordo com a expressão (2.27) (Kramer, 1996),

$$\tau = G \gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.27)$$

em que τ e γ representam, respectivamente, a tensão de corte e a distorção de um elemento infinitesimal do material, G o módulo elástico de distorção e η o coeficiente de viscosidade do material. A Figura 2.5 representa uma camada de solo com espessura infinitesimal dz , sujeita a uma distorção induzida pela aplicação de uma tensão de corte σ_{xz} .

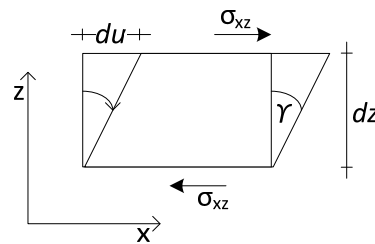


Figura 2.5 – Elemento infinitesimal sujeito a uma tensão de corte na direcção horizontal.
(adaptado de Kramer, 1996)

A modelação da mesma camada, da Figura 2.5, de acordo com o modelo Kelvin-Voigt é apresentada na Figura 2.6.

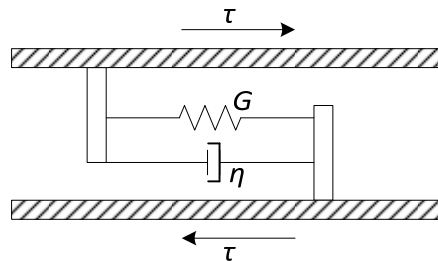


Figura 2.6 – Modelo do sólido de Kelvin-Voigt.
(adaptado de Kramer, 1996)

Se for assumido que a deformação de corte, γ , é induzida por uma onda de corte harmónica, com frequência ω , então a deformação de corte toma a forma da expressão (2.28),

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (2.28)$$

em que γ_0 é a amplitude máxima da deformação.

Também deste modo a tensão de corte, τ , é obtida por aplicação da expressão (2.27) e assume a forma da expressão (2.29).

$$\tau = G \gamma_0 \sin(\omega t) + \eta \gamma_0 \omega \cos(\omega t) \quad (2.29)$$

Considerando que o material sofre um ciclo de histerese completo, Figura 2.7, correspondente a um ciclo de carga, a área da elipse (Δw) é traduzida por (2.30), a energia de deformação máxima (w) por (2.31) e o amortecimento correspondente através de (2.32).

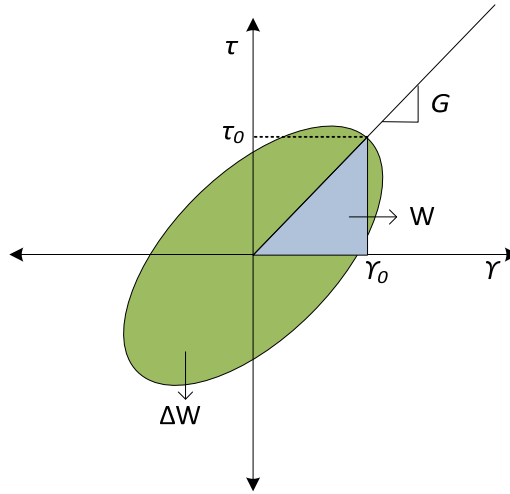


Figura 2.7 – Ciclo de histerese de uma camada, devido à aplicação de uma carga cíclica.
(adaptado de Kramer, 1996)

$$\Delta w = \pi \eta \omega \gamma_0^2 \quad (2.30)$$

$$w = \frac{\gamma_0 \tau_0}{2} = \frac{G \gamma_0^2}{2} \quad (2.31)$$

$$\xi = \frac{\Delta w}{4 \pi w} = \frac{\Delta w}{2 \pi G \gamma_0^2} = \frac{\eta \omega}{2 G} \quad (2.32)$$

2.3.2. Aplicação da propagação de ondas para avaliação dos deslocamentos do solo

A avaliação da resposta de uma camada de solo, face à aplicação de uma acção cíclica na sua base, é efectuada recorrendo-se à propagação unidireccional de ondas de corte através da camada de solo.

Recorrendo à teoria das ondas tem-se que o deslocamento da onda pode ser traduzido pela equação diferencial (2.33), em que v representa a velocidade de propagação da onda no meio constituído pelo material da camada.

$$\frac{du^2}{dt^2} = v^2 \frac{du^2}{dx^2} \Rightarrow u(x, t) = f(v t - x) + g(v t + x) \quad (2.33)$$

Uma vez que a avaliação dos deslocamentos horizontais do solo é efectuada recorrendo-se à propagação vertical de ondas de corte, com polarização também horizontal, apenas se fará referências para estas, substituindo-se a variável x por z (profundidade).

A utilização das ondas de corte, de polarização horizontal, na avaliação dos deslocamentos horizontais do solo, prende-se com o facto de estas serem as principais componentes do movimento pretendido.

Tem-se assim que na expressão (2.33), $v = v_s$, em que

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Em ondas sinusoidais, o deslocamento através de um meio pode ser descrito através da expressão (2.34 a), ou (2.34 b) utilizando a notação complexa,

$$u(z, t) = a \cos(\omega t + kz) + b \sin(\omega t - kz) \quad (2.34 a)$$

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)} \quad (2.34 b)$$

em que ω é agora a frequência angular da onda, k o número de onda, definido na expressão por (2.35), variando de material para material, e $Ae^{i(\omega t + kz)}$ e $Be^{i(\omega t - kz)}$ as parcelas respectivas da onda incidente e da reflectida.

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (2.35)$$

No entanto, no caso em que a propagação ocorre em aglomerados de materiais, como por exemplo os solos, em que características sejam diferentes, é natural que ocorram alterações à energia propagada principalmente ao nível das interfaces entre materiais. Para estes casos, a diferença de impedâncias verificada entre os dois materiais, resulta em que parte da energia seja transmitida e parte seja reflectida, como o exemplo da Figura 2.8.

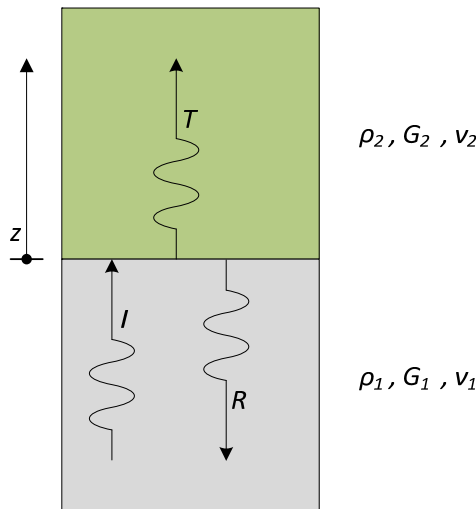


Figura 2.8 – Exemplo da decomposição de uma onda na fronteira entre dois materiais com diferentes impedâncias.

O comprimento de onda, λ , é dependente do material em que a onda se desloca sendo obtido através da expressão (2.36) em que v é a velocidade de propagação no meio, ω a frequência angular da onda.

$$\lambda_i = \frac{2\pi}{k_i} = \frac{2\pi}{\omega} v \quad (2.36)$$

Para o exemplo da Figura 2.8, o comprimento de onda difere entre os materiais 1 e 2, resultando que tanto a onda incidente como a onda reflectida possuem o mesmo λ , dado que se propagam ambas no mesmo material.

Considerando que a onda incidente é proveniente de uma excitação harmónica com frequência ω , expressa de acordo com (2.34 b), o deslocamento de um ponto qualquer do material, à passagem de cada uma das onda, pode ser descrito por (2.37 a), (2.37 b) e (2.37 c), de acordo com o referencial indicado na Figura 2.8,

$$u_I(z, t) = A_I e^{i(\omega t - k_1 z)} \quad (2.37 \text{ a})$$

$$u_R(z, t) = A_R e^{i(\omega t + k_1 z)} \quad (2.37 \text{ b})$$

$$u_T(z, t) = A_T e^{i(\omega t - k_2 z)} \quad (2.37 \text{ c})$$

em que A_I , A_R e A_T são respectivamente as amplitudes da onda incidente, reflectida e transmitida que serão abordadas mais à frente no texto.

A tensão de corte, τ , aplicada, por exemplo à passagem da onda incidente, pode ser obtida pela derivada do deslocamento respectivo através da expressão (2.38 a).

$$\tau_{onda}(z, t) = G_{material} \frac{du_{onda}(z, t)}{dz} = -ik_{material} G_{material} A_{onda} e^{i(\omega t - k_{material} z)} \quad (2.38 \text{ a})$$

Considerando-se a igualdade (2.35) a expressão anterior adquire a forma (2.38 b).

$$\tau_{onda}(z, t) = -i \omega_{onda} \rho_{material} v_{material} A_{onda} e^{i(\omega t - k_{material} z)} \quad (2.38 \text{ b})$$

A compatibilidade cinemática implica que, para o interface entre os dois materiais, os deslocamentos causados pelas ondas incidente, reflectida e transmitida, sejam compatíveis, originando a igualdade (2.39 a) e as respectivas tensões se equilibrem, ocasionando a igualdade (2.39 b), para o caso de tensão induzida.

$$u_I(0, t) + u_R(0, t) = u_T(0, t) \quad (2.39 \text{ a})$$

$$\tau_I(0, t) + \tau_R(0, t) = \tau_T(0, t) \quad (2.39 \text{ b})$$

Das igualdades (2.39 a) e (2.39 b) resultam as igualdades respectivas (2.40 a) e (2.40 b).

$$A_I + A_R = A_T \quad (2.40 \text{ a})$$

$$\tau_I + \tau_R = \tau_T \quad (2.40 \text{ b})$$

Ao substituir na expressão (2.38 a) as igualdades (2.40 a) e (2.40 b) é obtida a relação entre as amplitudes das ondas reflectida e transmitida em função da amplitude da onda incidente e das características, $\rho_{material}$ e $v_{material}$, dos materiais de propagação, de acordo com as expressões (2.41 a) e (2.41 b)

$$A_R = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A_I \quad (2.41 \text{ a})$$

$$A_T = \frac{2 \rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A_I \quad (2.41 \text{ b})$$

Assim, é possível resolver o problema da repartição da energia nas fronteiras entre os materiais, dado que as diferenças de propriedades exercem influência no modo como a onda é transmitida.

2.3.3. Avaliação da resposta do solo a acções cíclicas de carácter sísmico

A obtenção da resposta de um solo a acções sísmicas, em termos de deslocamentos horizontais à superfície, é efectuada considerando a propagação vertical de ondas S através de um perfil estratigráfico, por vezes também designado como coluna de solo, sendo traduzida na forma de uma função de transferência, calculada entre a base e o topo do perfil.

Para a modelação do perfil estratigráfico, representativo do solo, considera-se que este constitui um meio estratificado, composto por um conjunto de camadas homogéneas sobrepostas, e que assenta num semi-espaco elástico com rigidez de corte substancialmente superior, habitualmente designado como substrato rochoso. É ao nível destes estrato mais rígido que se efectua a introdução da acção sísmica, na forma de aceleração prescrita (conhecida).

É também assumido que o conjunto de camadas se estende por dimensão infinita em x e y , sendo a análise efectuada no plano xz e para uma dimensão unitária no plano xy . Estão ainda impedidos os deslocamentos verticais, do modelo.

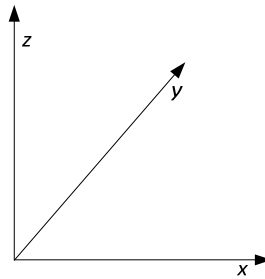


Figura 2.9 – Referencial espacial considerado.

A adopção do modelo de Kelvin-Voigt para a modelação de cada uma das camadas de material implica que a expressão (2.33) seja reescrita na forma (2.44), de modo a que seja contemplado a contribuição da viscosidade do material, η , tendo-se como solução a expressão (2.43), para o deslocamento.

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = v^2 \frac{d^2 u}{dz^2} + \eta \frac{d^3 u}{dz^2 dt} \quad (2.42)$$

$$u(x, t) = A e^{i(\omega t + k^* z)} + B e^{i(\omega t - k^* z)} \quad (2.43)$$

em que A e B são as amplitudes das ondas, que se propagam no sentido ascendente e descendente, respectivamente, e k^* o número de onda complexo obtido pela expressão (2.44) e que depende do meio de propagação.

$$k^* = \frac{\omega}{v} (1 - i\xi) \quad (2.44)$$

A expressão (2.43), apresentada anteriormente, passa a ser reescrita da forma (2.45 a) ou (2.45 b) consoante se trate da base ($z_m = 0$) ou topo ($z_m = h_m$) da camada m .

$$u_m(z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad (2.45 a)$$

$$u_m(z_m = h_m, t) = (A_m e^{i k^* m h_m} + B_m e^{-i k^* m h_m})e^{i\omega t} \quad (2.45 b)$$

De igual forma se têm as transformações para a tensão de corte na base (2.46 a) e no topo (2.46 b) da camada m .

$$\tau_m(z_m = 0, t) = i k^* G^* (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad (2.46 a)$$

$$\tau_m(z_m = h_m, t) = i k^* G^* (A_m e^{i k^* m h_m} + B_m e^{-i k^* m h_m})e^{i\omega t} \quad (2.46 b)$$

em que G^* é o módulo de corte complexo obtido por (2.50).

$$G^* = G(1 - 2i\xi) \quad (2.47)(2.34)$$

Da compatibilização de deslocamentos, no interface de duas camadas m e $m + 1$, implica que estes sejam iguais, ocorrendo o mesmo para as tensões, expressões (2.48 a) e (2.48 b) respectivamente.

$$u_m(z_m = h_m, t) = u_{m+1}(z_{m+1} = 0, t) \quad (2.48 a)$$

$$\tau_m(z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(z_{m+1} = 0, t) \quad (2.48 b)$$

Resulta então que os valores da amplitude, A e B , para a camada $m + 1$, podem ser obtidos em função dos valores relativos à camada anterior, m , de acordo com (2.49 a), ou (2.49 b) e (2.49 c) racionalizando as funções.

$$A_{m+1} + B_{m+1} = \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} (A_m e^{i k^* m h_m} + B_m e^{-i k^* m h_m}) \quad (2.49 a)$$

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} \left[A_m \left(1 + \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \right) e^{i k^* m h_m} + B_m \left(1 - \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \right) e^{-i k^* m h_m} \right] \quad (2.49 b)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} \left[A_m \left(1 - \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \right) e^{i k^* m h_m} + B_m \left(1 + \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \right) e^{-i k^* m h_m} \right] \quad (2.49 c)$$

Uma vez que a tensão de corte ao nível da superfície é necessariamente nula, dado ser uma superfície livre sem restrição de movimento na direcção do movimento (horizontal), a aplicação da expressão implica que $A_1 = B_1$ para o nível da superfície resultando:

$$A_m = a_m(\omega) A_1$$

$$B_m = b_m(\omega) B_1$$

Deste modo, é possível relacionar-se o deslocamento da camada m com o da camada 1, em que $a_m(\omega)$ e $b_m(\omega)$ representam a aplicação das expressões (2.49 b) e (2.49 c), para todas as camadas entre 1 e m .

A função de transferência complexa, que permite relacionar a amplitude de deslocamentos da camada m com os da camada imediatamente inferior $m + 1$, para uma dada frequência ω , pode ser expressa por (2.50).

$$H_{m,m+1}(\omega) = \frac{a_m(\omega) + b_m(\omega)}{a_{m+1}(\omega) + b_{m+1}(\omega)} \quad (2.50)$$

Daqui resulta que o conhecimento do deslocamento de um ponto qualquer, num solo, permite a obtenção do deslocamento de um determinado ponto, para o solo modelado, em função do deslocamento de outro ponto, sendo este conhecido, e relacionando-se através da função de transferência entre estes dois pontos, expressão (2.50).

2.3.4. Modelo linear equivalente

A aplicação de cargas cíclicas a um solo, que esteja localizado abaixo da superfície e afastado de estruturas, implica que este apresente um ciclo de histerese semelhante ao da Figura 2.10.

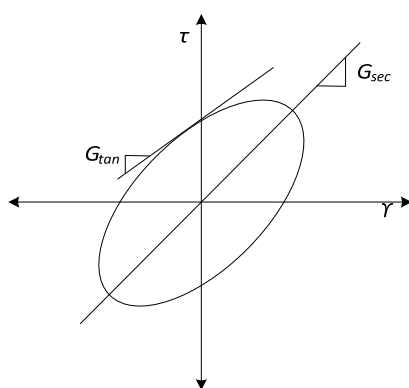


Figura 2.10 – Exemplo de um ciclo de histerese de um solo.
(adaptado de Kramer, 1996)

De um modo geral o ciclo é descrito pela inclinação e abertura da elipse, em que a inclinação depende da rigidez de corte do solo, podendo ser descrita em qualquer ponto como a inclinação da tangente à elipse, módulo de distorção instantâneo, G_{tan} . Este valor varia no decurso do ciclo de carga, no entanto a rigidez média pode ser representada pelo módulo de corte secante, G_{sec} , obtido através da expressão (2.51),

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.51)$$

em que τ_c e γ_c representam, respectivamente, as amplitudes da tensão e distorção de corte ocorridos.

A energia dissipada no ciclo pode ser obtida considerando $G = G_{sec}$ na expressão (2.32).

Este modelo constitui apenas uma aproximação do comportamento do solo, sendo admitido que os materiais não possuem tensão de ruptura e que a tensão volta ao valor nulo, por se tratar de um modelo elástico. Desta forma, os materiais voltam à deformação inicial, antes da aplicação do ciclo de carga, e o modelo não pode ser directamente utilizado para problemas em que sejam verificadas deformações permanentes.

No entanto, a aplicação de um ciclo de carga aos solos induz degradação do módulo de distorção assim como a alteração da energia dissipada em cada ciclo.

A evolução do módulo de distorção assim como a energia dissipada nos ciclos pode ser traduzida com as curvas de Ishibashi e Zang (1993), cf. Figura 2.11 e Figura 2.12 respectivamente, sendo ambas dependentes do índice de plasticidade e da tensão de confinamento do material.

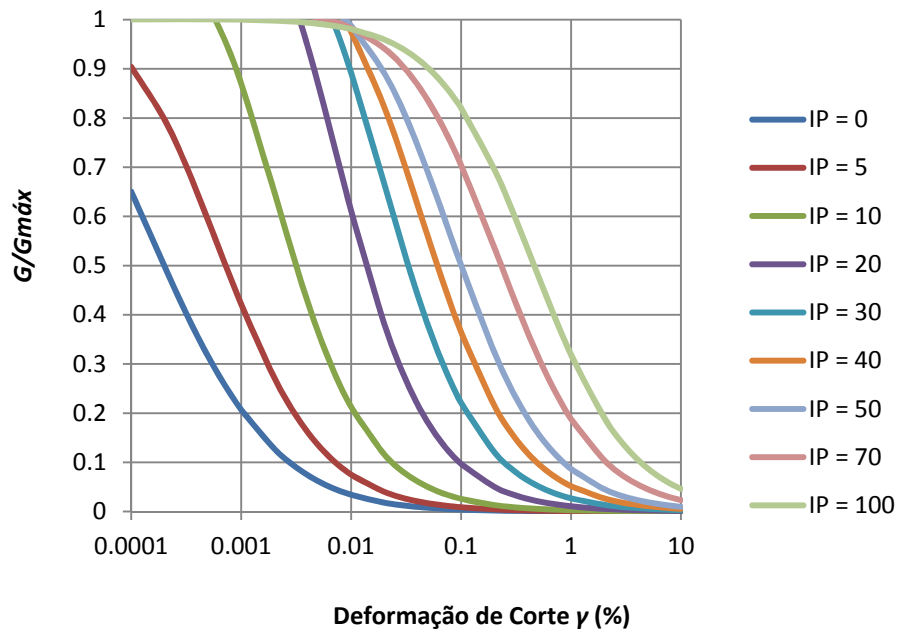


Figura 2.11 – Curvas de degradação do módulo de corte, para tensão de confinamento de 10 kPa.
(Ishibashi e Zang, 1993)

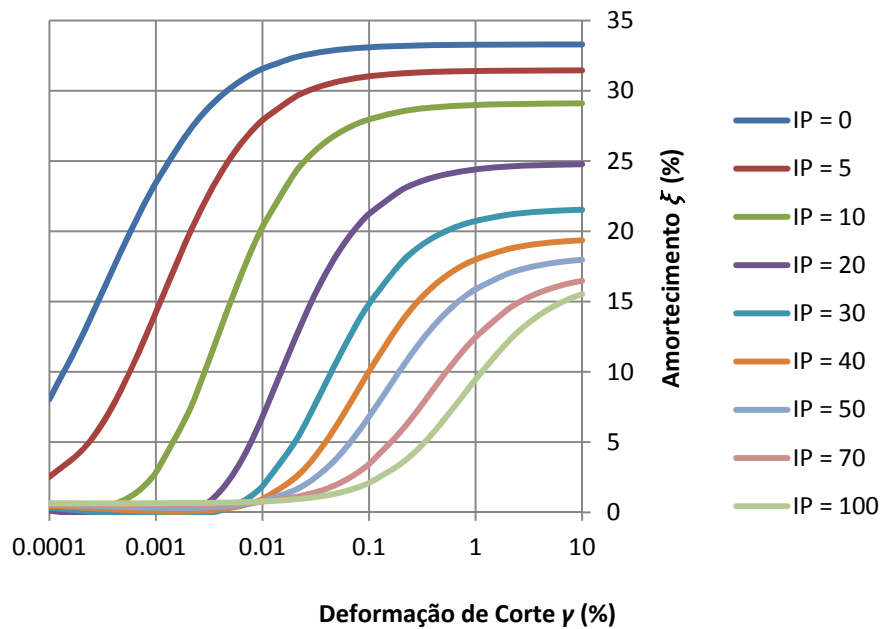


Figura 2.12 – Curvas de evolução da energia dissipada, para tensão de confinamento de 10 kPa.
(Ishibashi e Zang, 1993)

A curva de degradação do módulo de corte, Figura 2.11, representa a razão, adimensional, entre o módulo de deformação (G), agora referente ao módulo secante de corte, e o módulo de corte máximo ou para muito pequenas deformações ($G_{máx}$) do solo para uma dada deformação γ_c . O valor do módulo $G_{máx}$ é obtido pela expressão (2.52).

$$G_{máx} = \rho_{material} v_{material}^2 \quad (2.52)$$

Por sua vez, a curva da dependência do amortecimento relativamente a γ_c (Figura 2.12), representa a fracção de energia dissipada durante um ciclo de carga de amplitude γ_c de acordo com (2.32).

A utilização do método linear equivalente permite considerar numa formulação relativamente simples a não-linearidade e a histerese dos solos no cálculo da resposta dos estratos de solos, face à aplicação de acções cíclicas, efectuando-se um processo iterativo para a compatibilização dos valores de G e ξ com a amplitude de deformação.

Este processo tem início com a adopção de uma estimativa inicial da deformação γ_0 , em cada camada de material, sendo os valores de G e ξ obtidos através do processo exemplificado na Figura 2.13.

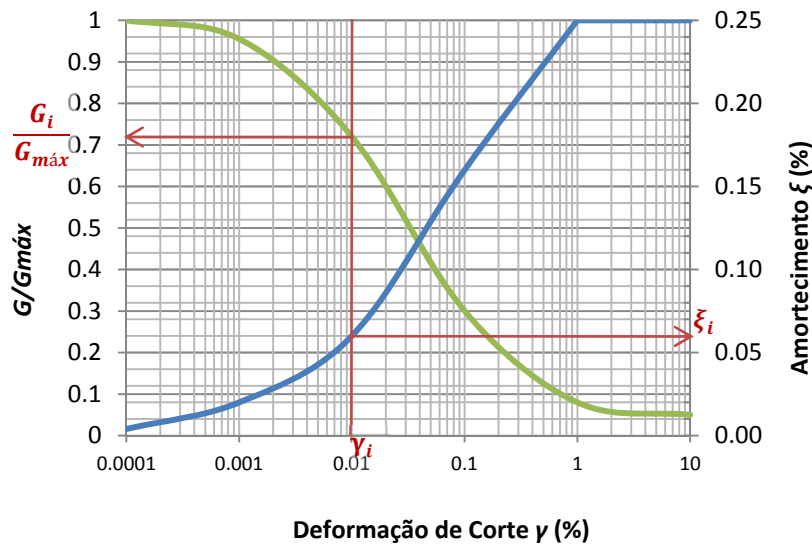


Figura 2.13 – Exemplo de obtenção dos parâmetros G e ξ relativos à deformação γ_i .

Após a obtenção dos parâmetros G e ξ é calculada a deformação eficaz, γ_{eff} , da iteração i , através da expressão (2.53),

$$\gamma_{eff} = R_\gamma \gamma_{máx} \quad (2.53)$$

em que $\gamma_{máx}$ é o valor de pico da deformação e R_γ um factor que permite a obtenção de γ_{eff} como valor representativo, da deformação de corte média, no tempo.

Segundo Idriss e Sun (1991), para acções cíclicas com carácter sísmico o factor R_γ encontra-se dependente da magnitude do evento (M_w), energia libertada na fonte, podendo ser estimado a partir da expressão (2.54).

$$R_\gamma = \frac{M_w - 1}{10} \quad (2.54)$$

Após o cálculo do parâmetro γ_{eff} é efectuada a comparação com γ da iteração anterior, sendo que se a diferença entre estes se encontrar abaixo de um dado valor, pré-definido, considera-se que a convergência foi atingida e são obtidos os parâmetros G e ξ para o material. Caso contrário, o valor de γ_{eff} é utilizado para a obtenção de novos valores de G e ξ , repetindo-se todo o processo até ser atingida a convergência ou, em alternativa, seja atingido um dado número de iterações.

É importante referir que, em geral, a convergência do processo não é absolutamente garantida, no entanto, são obtidas diferenças entre valores γ de iterações consecutivas inferiores a 10%, normalmente até as primeiras 5 iterações (Schnabel *et al.*, 1972).

2.3.5. Abordagem estocástica para a obtenção da resposta do solo

Na abordagem estocástica, para a obtenção da resposta do solo, a acção sísmica considerada é representada por um processo estocástico, o qual se encontra caracterizado por um espectro de potência para o firme rochoso, sobre o qual assenta o meio estratificado, que representa o solo.

Esta abordagem permite calcular a função de transferência entre a base e o topo das várias camadas de material que constituem o solo, para um dado local, através da propagação vertical das ondas de corte no meio estratificado.

A simulação do comportamento não linear dos materiais, aquando a aplicação de acções cíclicas, efectua-se com a aplicação do modelo linear equivalente.

Dado que o substrato rochoso constitui uma das fronteiras da coluna de solo, as condições cinemáticas implicam que os deslocamentos da base da coluna de solo e do substrato sejam iguais, expressão (2.39 a), conhecendo-se por isso um deslocamento de um ponto da coluna de solo, sendo que tal possibilita a obtenção dos restantes deslocamentos, de acordo com 2.3.3.

A função de transferência, que traduz a relação entre os deslocamentos na base e topo da coluna de solo, constituída por n camadas de materiais sobrepostas e assentes em substrato rochoso, é obtida pela multiplicação do módulo das várias funções de transferências, complexas, calculadas para cada uma das camadas.

A obtenção do espectro de potência da resposta, à superfície, de um oscilador linear de $1GDL$ efectua-se de acordo com a expressão (2.18), multiplicando o espectro de potência, referente ao substrato rochoso, pela função de transferência da coluna de solo.

O cálculo da resposta de uma coluna de solo face a uma acção sísmica na base é, no entanto um processo iterativo dado ser necessária a consideração do comportamento não linear dos materiais, recorrendo-se ao modelo linear equivalente para tal.

Os cálculos sucessivos são por isso incluídos numa rotina computacional, algoritmo de cálculo, a qual efectua o cálculo da função de transferência, e a transformação do espectro de potência, em espectro de potência de resposta, para cada uma das camadas desde a base até ao topo da coluna, resultando o espectro de potência da resposta à superfície que poderá ser posteriormente utilizado para o cálculo do espectro de resposta, com a aplicação da expressão (2.24).

Na Figura 2.14, é apresentado um esquema do funcionamento da rotina de cálculo utilizada para a obtenção da resposta de uma coluna de solo face a acções sísmicas aplicadas na base da mesma, em que h, ρ, IP, G_0 e ξ_0 são os parâmetros iniciais das camadas de solo, $S_Y(\omega)_{j,i}$ o espectro de potência, relativo à camada i , para a iteração j , H_Y e H_a representam respectivamente as funções de transferência, na iteração j e do conjunto de camadas de solo, e Δ o erro entre as distorções máximas obtidas entre iterações consecutivas. O valor do erro, Δ , é obtido através da expressão (2.55), sendo o limite um valor pré-definido no algoritmo.

$$\Delta = \frac{\gamma_{\text{máx}, \text{iter } j} - \gamma_{\text{máx}, \text{iter } j-1}}{\gamma_{\text{máx}, \text{iter } j}} \quad (2.55)$$

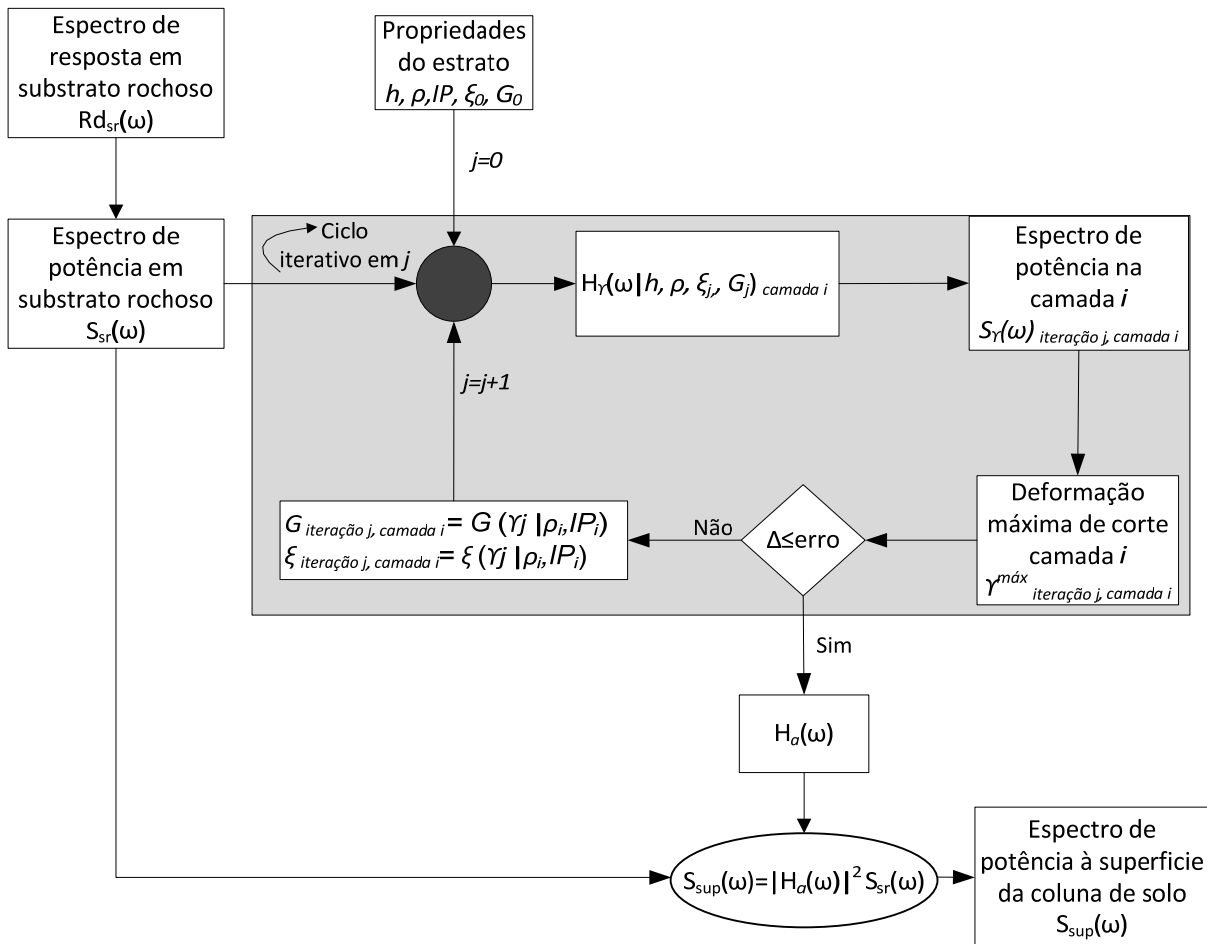


Figura 2.14 – Fluxograma da rotina de cálculo do espectro de resposta à superfície.
(adaptado de Carvalho et al., 2008)

2.4. Comentários Finais

A metodologia estocástica é uma abordagem de extrema utilidade para a modelação de eventos sísmicos, geralmente representados por uma sequência de acelerações no decurso do tempo (acelerograma), dado que a abordagem permite contemplar inúmeras variações do mesmo, considerando os processos estocásticos, e caracterizando o referido evento com base na estatística e nos valores com maior probabilidade de ocorrência para cada instante.

A caracterização do evento sísmico, representado por um processo estocástico em função do tempo, é de um modo geral efectuada com recurso à transformada de Fourier do processo, sendo obtido o espectro de potência do mesmo, $S_a(\omega)$, agora em função da frequência. Este espectro representa o conteúdo energético do processo, podendo ser utilizado não só para a obtenção do espectro de potência da resposta, 2.2.2, mas também para a geração de acelerogramas artificiais (p. ex. Boore, 2003).

O cálculo da resposta de uma coluna de solo, representada por camadas de materiais dispostos horizontalmente e assentes num semi-espço elástico rochoso (substrato rochoso), efectua-se tendo em conta a propagação de ondas de corte, através das diferentes camadas utilizando-se o modelo linear equivalente para a contemplação do comportamento não linear dos materiais, que constituem o solo, face a acções cíclicas, e calculando-se a função de transferência de efeitos entre o topo e a base da coluna.

A obtenção do espectro de potência da resposta, à superfície da coluna de solo é efectuada com a multiplicação do espectro de potência, que caracteriza a acção sísmica em substrato rochoso, pela função de transferência, da coluna de solo, sendo o espectro de resposta obtido com a aplicação da expressão (2.24).

Este procedimento constitui a metodologia para a obtenção da resposta de uma sequência estratigráfica (coluna de solo) por meio de uma abordagem estocástica (Serra e Caldeira, 1997) e foi a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados apresentados no capítulo 4.

3. Modelação de Perfis Estratigráficos para o Arquipélago dos Açores

3.1. Introdução

O conteúdo espectral dos movimentos sísmicos superficiais é o resultado de um processo complexo de transferência de energia através de um meio, intermediário entre o local de origem do evento sísmico (fonte sísmica) e a superfície da crosta terrestre. Este processo é fortemente condicionado pelo mecanismo de rotura, pela localização do foco, pela distância focal e com especial relevo (dado o tema da presente dissertação) pela geologia do local e, em particular, pelas características dos terrenos menos profundos, maioritariamente solos.

As características dos solos constituem por isso uma informação de extrema utilidade para que se possa estabelecer uma tentativa de correlação, entre os registos sísmicos num dado local e o terreno subjacente, de modo a avaliar a influência da variável “solo” na propagação da energia sísmica na proximidade da superfície.

Nos casos em que os registos sejam inexistentes, ou em que o seu reduzido número não permita avaliar a influência do solo na transmissão da energia, é possível efectuar-se a simulação dos movimentos superficiais devidos a eventos sísmicos, recorrendo-se a modelos estocásticos para modelar estes eventos e considerando modelos que visem simular a propagação da energia sísmica através dos solos como p. ex. o modelo linear equivalente, que considera a propagação vertical de ondas S, com polarização horizontal, através de um perfil estratigráfico (Serra e Caldeira, 1997).

A realização destas simulações é apenas possível quando existe uma base de dados de perfis estratigráficos (“colunas de solo”), cujas propriedades necessárias à aplicação dos modelos se encontrem totalmente definidas. As informações contidas na base de dados podem ter origem em sondagens resultantes de prospecção, ou serem geradas através de metodologias estocásticas baseadas em informações reais.

Para o Arquipélago dos Açores, a base de dados existente não contempla um número suficiente de perfis estratigráficos totalmente caracterizados, inviabilizando por isso uma simulação, com significância estatística, de movimentos sísmicos à superfície pela metodologia referida.

Com vista à resolução do problema, que constitui a falta de informação acerca dos terrenos, efectuou-se o levantamento de informação existente, que se encontrava dispersa, resultando na elaboração de uma base de dados dos solos e em seis modelos estratigráficos tipificados, cujos materiais e propriedades das camadas estão totalmente definidos.

Os modelos elaborados permitem gerar, através da metodologia estocástica, uma amostra de perfis estratigráficos sintéticos, pretendendo-se que o conjunto resultante seja representativo da variabilidade natural dos solos da região, permitindo assim colmatar as lacunas existentes na base de dados, relativa à informação geotécnica dos terrenos

3.2. Enquadramento Regional

O Arquipélago dos Açores é uma região de origem vulcânica que se encontra geograficamente localizada no oceano Atlântico Norte, mais concretamente no polígono formado pelas latitudes 36° e 40° Norte e longitudes 25° e 31° Oeste, compreendendo um total de nove ilhas que se encontram distribuídas por três grupos: Ocidental (Corvo e Flores), Central (Faial, Graciosa, Pico, Terceira e São Jorge) e Oriental (São Miguel e Santa Maria).

Segundo Ferreira (2005), a região encontra-se ainda inserida numa zona de acomodação de tensões entre três importantes estruturas tectónicas (placa Africana, placa Euro-Asiática e placa Americana) estando grande parte das ilhas, excepto Corvo e Flores, numa estrutura com forma aproximadamente triangular denominada por Plataforma dos Açores (Forjaz, 1988).

Ainda no quadro tectónico, é essencial mencionar a existência de uma faixa de expansão oceânica na fronteira entre a plataforma dos Açores e a placa Euro-Asiática, denominada por Rife da Terceira sobre o qual se encontram localizadas as ilhas da Terceira, Graciosa e a parte ocidental da ilha de S. Miguel.

A Figura 3.1 ilustra a localização geográfica do arquipélago, assim como as estruturas tectónicas existentes nas proximidades deste e os movimentos aí prevalentes.

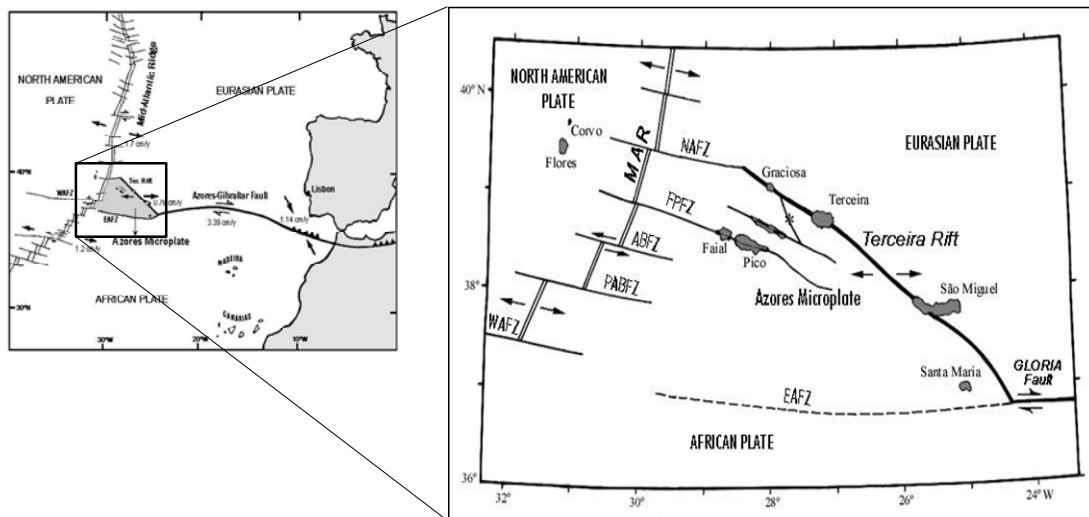


Figura 3.1– Enquadramento geotectónico dos Açores (*adaptado de Forjaz, 1988*).

A dinâmica do conjunto de estruturas tectónicas prevalentes na região tem ainda um papel importante na sismicidade e no vulcanismo que ocorrem na região, tendo especial ênfase nas características dos materiais emitidos e condiciona a sua variação nas diferentes ilhas (Nunes, 2002).

De acordo com Cas e Wright (1987), os eventos vulcânicos podem ser classificados como Havaiano, Restromboliano, Vulcaniano, Sub-Pliniano, Pliniano, Ultraplino, Surtseiano e Freatoplino, estando esta classificação dependente de parâmetros, tais como:

- a magnitude da fase eruptiva, determinada em função do volume total emitido;
- o poder dispersivo, definido pela área coberta por piroclastos de queda;
- a intensidade, dependente da altura da coluna eruptiva;
- o potencial destrutivo da erupção, definido pela área abrangida pela isópaca de um metro.

O carácter explosivo dos eventos incrementa na ordem em que os eventos são mencionados, apresentando-se na Figura 3.2 a classificação proposta por Cas e Wright (1987).

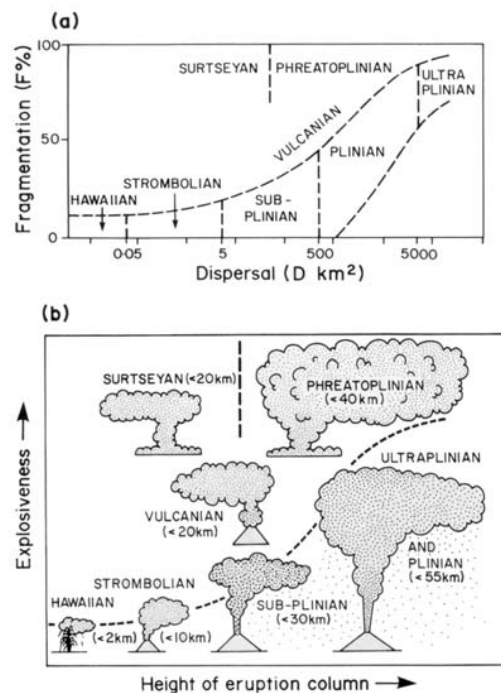


Figura 3.2– Classificação da actividade vulcânica proposta por Cas e Wright (1987).

Os eventos vulcânicos podem ainda ser classificados como monogenéticos ou poligenéticos, consoante ocorra apenas um evento isolado ou um conjunto de eventos, sendo que as durações de ocorrência podem variar de dezenas de anos (eventos monogenéticos) até milhares de anos (poligenéticos) (Nunes, 2002).

Ainda de acordo com Nunes (2002) é possível associar-se os produtos emitidos às fases que ocorrem num evento estando associadas as escoadas lávicas a fases efusivas e os piroclastos a fases explosivas, tal como no esquema apresentado na Figura 3.3.

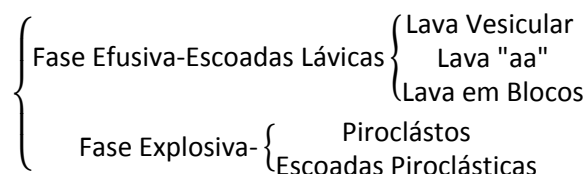


Figura 3.3– Esquema de fases eruptivas e produtos correspondentes.

As sequências de eventos vulcânicos têm por isso um papel fundamental, na definição da paisagem e na estrutura dos terrenos de uma região com génese vulcânica, sendo também perceptível que a maior influência estratigráfica provém de eventos vulcânicos com carácter poligenético. Tal advém por estes permitirem a ocorrência de diferentes tipos de episódios vulcânicos e também devido à sua duração longa, que pode atingir dezenas de milhares de anos (Nunes, 2002; França *et al.*, 2003).

Ainda, a longa duração associada aos eventos poligenéticos permite uma eventual ocorrência de processos erosivos, que ocasionam a alternância de estratos vulcânicos com estratos sedimentares.

A disposição das camadas de materiais encontra-se ainda associada à localização do local em relação à estrutura vulcânica activa, assim como das condições atmosféricas (Nunes *et al.*, 2009).

A natureza vulcânica do arquipélago assume ainda um papel condicionante no que respeita às características geológicas dos materiais no arquipélago, verificando-se a existência de poucas variações nas propriedades geo-mecânicas dos materiais, para as diferentes ilhas (Fragoso, 2006). Tal facto possibilita que se efectue o tratamento estatístico e a sintetização das propriedades dos materiais da região.

3.3. Modelos de Perfis Estratigráficos para o Arquipélago dos Açores

A aplicação do modelo linear equivalente a perfis estratigráficos de solo, com vista à avaliação dos movimentos sísmicos à superfície do terreno, encontra-se dependente da disponibilidade de informação sobre os materiais e sua sequência de deposição.

Para a região dos Açores, a inacessibilidade, ou pelo menos a insuficiência, de perfis estratigráficos baseados em sondagens geológicas não tem permitido a avaliação dos efeitos sísmicos de sítio de forma sistemática representativa da heterogeneidade geológica regional.

Como abordagem para a colmatação das lacunas existentes, relativamente aos solos da região, é possível a adopção de métodos estatísticos de geração de colunas estratigráficas sintéticas. O carácter vulcânico da região em análise e a sensibilidade, já mencionada, das sequências estratigráficas e das propriedades dos solos relativamente ao tipo de eventos vulcânicos demonstra a importância de se dispor de dados relativos à estratigrafia dos solos dos locais estudados para a correcta interpretação dos movimentos, registados ou simulados.

Para a elaboração de uma base de dados de propriedades dos solos existentes recorreu-se em primeiro lugar a estudos publicados sobre o Arquipélago, como por exemplo Motta e Nunes (2002), Malheiro e Nunes (2007) e Teves-Costa e Veludo (2013), permitindo assim reunir a informação que se encontrava dispersa.

As informações recolhidas foram ainda complementadas com informação proveniente de estudos internacionais realizados para regiões de igual génese, por exemplo Shoji *et al.* (1994), Arnalds *et al.* (2007) e Di Traglia *et al.* (2013).

Ainda neste âmbito foi constatada a existência de alguns modelos de perfis estratigráficos, entre os quais interessa mencionar os modelos presentes em Malheiro e Nunes (2007) e Teves-Costa e Veludo (2013).

O resultado é uma estrutura de dados que contém não só a informação referente aos solos da região, mas também modelos aproximados das sequências estratigráficas.

3.3.1. Propriedades de materiais constituintes

A informação de base recolhida é destinada à geração e caracterização de modelos geotécnicos de perfis estratigráficos, adequados à aplicação do modelo de propagação vertical de ondas de corte com polarização horizontal, conforme descrito em Serra e Caldeira (1997).

Tal como mencionado previamente, secção 2.3.3, o modelo considerado é um modelo pseudo-não linear com ajuste iterativo das propriedades mecânicas dos solos relativas à deformabilidade (módulo de distorção secante elástico) e à dissipação de energia por histerese mecânica (fracção de amortecimento crítico) em função do valor médio temporal da distorção ocorrida em cada zona.

A constituição de cada zona individual pode ser feita por um estrato ou por uma sub-divisão do mesmo, sendo a espessura mínima adoptada para cada zona função do comprimento de onda associado à frequência mais elevada presente no movimento excitador.

A subdivisão do estrato deve-se ao facto da avaliação da resposta sísmica, do solo, ser efectuada com base na propagação de ondas e ser necessário contemplar pelo menos um comprimento de onda, λ , em cada sub-divisão do estrato. Este valor relaciona-se com a frequência através de a expressão (2.36), sendo necessário que para cada subdivisão se verifique a condição (3.1),

$$\lambda_i = \frac{2\pi}{\omega} v \quad (2.36)$$

$$h_{sub-divisão} \leq \frac{\lambda_{\omega^\dagger}}{m} \quad (3.1)$$

em que $h_{sub-divisão}$ é a espessura da subdivisão do estrato, λ_{ω^\dagger} o comprimento de onda associado à frequência mais elevada, e m o número de intervalos infinitesimais, do comprimento de onda, a considerar.

Para a aplicação do modelo é necessário conhecer as características de deformabilidade e de amortecimento, mas também a massa volúmica e ainda o índice de plasticidade dos materiais, para a classificação do tipo de curvas de degradação do módulo secante de distorção e da evolução da fracção de amortecimento crítico em função do nível médio de distorção (Vucetic e Dobry, 1991). Os solos não plásticos, de dimensão predominantemente areia ou cascalho, portanto não plásticos, são associados ao valor nulo do IP.

As informações recolhidas são agrupadas sob a forma de intervalos de variação, relativos à massa volúmica, velocidade de propagação elástica de ondas S e de estimativa – geotecnicamente informada – do índice de plasticidade de diferentes materiais geotécnicos identificados no Arquipélago, Quadro 3.1. Esta disposição permite a aplicação de metodologias estatísticas para a simulação de perfis estratigráficos sintéticos de solos que sejam compatíveis com a variabilidade geotécnica do Arquipélago.

Quadro 3.1 – Propriedades de materiais geotécnicos dos perfis estratigráficos para o Arquipélago dos Açores

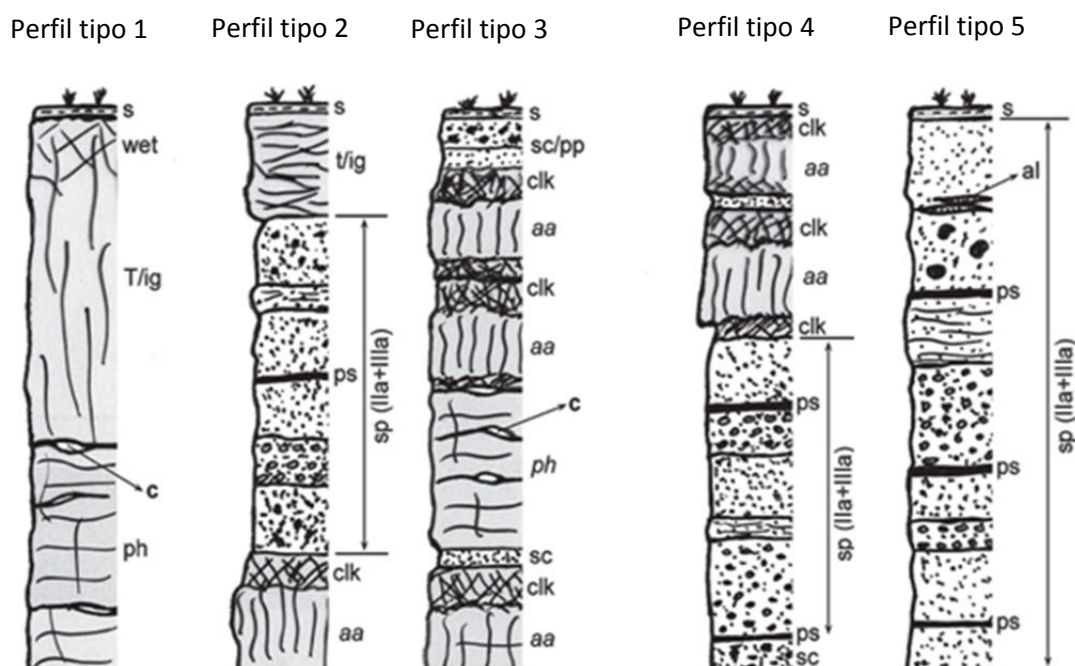
Material	ρ_{\min} [t/m ³]	ρ_{\max} [t/m ³]	$v_{s\min}$ [m/s]	$v_{s\max}$ [m/s]	Índice plasticidade [%]
Pedra-Pomes	0,601	0,738	220	412,5	10
Ignimbritos (Não soldados)	0,7	1,7	250	700	10
Tufos Surtseianos	1,121	1,733	130	800	40
Escória Basáltica	1,287	1,355	220	412,5	20
Basaltos de queda (Depósito)	1,53	1,733	80	200	N.P.
Ignimbritos (Soldados)	1,532	1,852	500	702	N.P.
Solos Pomíticos	1,6	1,8	220	412,5	10
Traquitos (Depósito Piroclástico)	1,619	1,983	220	412,5	10
Traquitos (Escoadas de Lava)	2,04	2,24	600	1570	0
Clinker	2	2,3	300	1000	20
Basalto (Escoadas de Lava)	2,24	2,548	1000	3300	N.P.
Basalto (Maciço)	2,548	2,956	1000	3300	N.P.
Basalto Vesicular	0,6	0,9	220	412,5	N.P.

Fontes: Fragoso (2006), Malheiro e Nunes (2007), Amaral *et al.* (2009), NP EN 1998-1 (2010), Maia (2011), Pernetá (2013), Teves Costa e Veludo (2013).

3.3.2. Modelos de base de perfis estratigráficos

Dada a sensibilidade, já mencionada, das estratigrafias relativamente à sequência de eventos vulcânicos e erosivos que as geram, a aplicação referidas das metodologias estatísticas para gerar conjuntos de perfis de estratigráficos deve ser efectuada com base em modelos existentes para a região.

De entre os modelos estratigráficos do arquipélago salientam-se os propostos por Malheiro e Nunes (2007), os quais resultaram da síntese de 1108 perfis estratigráficos reais, obtidos em diversas campanhas de sondagem na região. Estes modelos, apresentados na Figura 3.4, constituíram ainda a base de trabalho para a elaboração dos perfis de terreno, contidos no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010), relativos à região dos Açores.



Legenda: s: Solo Topo; **sc/pp**: Escória ou Depósitos Pomíticos; **clk**: Clinker; **aa**: Basaltos; **ph**: Basaltos Vesiculares (Escoada); **c**: caverna/vazio; **sc**: Escória; **al**: Depósitos Aluvionares; **ps**: Solos Paleolíticos; **sp**: Sequencia Pliniana; **t**: Tufos Surtsianos; **ig**: Ignimbrito Soldado; **wet**: Nível Freático; **T**: Traquito (Escoada)

Nota: Os modelos encontram-se dispostos pela ordem em que são apresentados no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010)

Figura 3.4– Modelos estratigráficos propostos por Malheiro e Nunes (2007)

Foi também constatada a existência de modelos mais recentes para Angra do Heroísmo, propostos por Teves-Costa e Veludo (2013). Estes modelos, apresentados na Figura 3.5, resultam da adopção do modelo proposto em Malheiro e Nunes (2007) para Angra do Heroísmo (Sé), (perfil tipo 1 e tipo 2), sendo as espessuras dos estratos e propriedades físicas das formações geológicas detalhadas em Nunes *et al.* (2001).

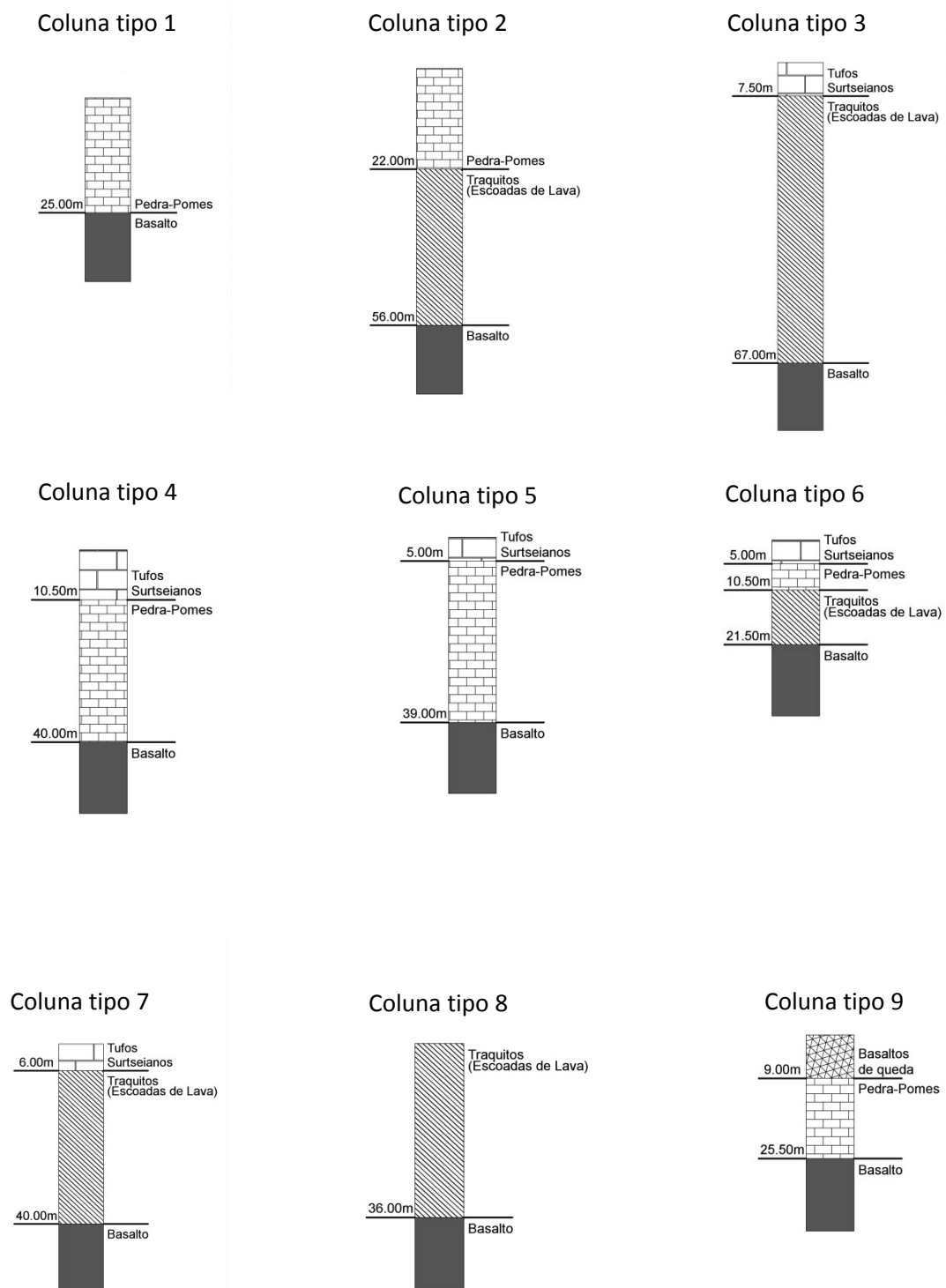


Figura 3.5 – Modelos de perfis estratigráficos propostos por Teves-Costa e Veludo (2013)

Ambos os modelos apresentados proporcionam uma base de trabalho, alicerçada em estratigrafias existentes na região, para a aplicação de metodologias estatísticas e geração dos conjuntos de perfis estratigráficos sintéticos.

3.3.3. Hipóteses simplificativas a efectuar

De modo a reduzir a ocorrência de singularidades nos perfis gerados, que colocaria em causa a representatividade estatística dos mesmos e seria uma fonte de erros numéricos para as simulações consequentes, é necessária a consideração de hipóteses simplificativas quanto aos materiais constituintes e aos estratos constituintes dos perfis estratigráficos.

Propriedades de materiais:

- os limites do intervalo para variação das propriedades dos materiais são independentes da escolha do tipo de perfil, considerando-se também que as propriedades de um material gerado serão as mesmas para um perfil, mesmo ocorrendo repetição do material;
- a existência de mais de uma possibilidade de material constituinte, para um estrato implica a elaboração de um novo tipo de perfil, alterando-se apenas o material para o estrato em questão;
- as características do material que constitui um estrato são consideradas constantes apenas se a espessura do estrato for menor ou igual a 3m, admitindo-se para espessuras superiores um crescimento linear em profundidade desde o topo até à base desde 95% a 105% do valor médio, limites estes definidos pelas expressões (3.2 a) e (3.2 b)

$$\rho_{Topo,Estrato} = (1 - 0,05) \cdot \rho_{Méd} \quad (3.2 a)$$

$$\rho_{Base,Estrato} = (1 + 0,05) \cdot \rho_{Méd} ; \quad (3.2 b)$$

- a velocidade de propagação das ondas de corte, num material, é definida a partir do módulo de distorção e da massa volúmica de acordo com a expressão (2.52);
- as propriedades mecânicas dos materiais correspondem a análises em tensões totais, decorrente de a resposta sísmica dos solos ser predominantemente não drenada, dada a diferença de velocidade entre os fenómenos de aumento de pressão intersticial (mecânico, local e associado à dilatação) e de dissipação da mesma (hidráulico, global). Não são considerados fenómenos de liquefacção.

Propriedades de estratos:

- cada estrato é composto por um único material de forma a permitir a constituição de um meio, aproximadamente homogéneo, para a propagação de ondas;
- a menos de casos de excepção, suprimem-se os estratos de espessura inferior a 0,5m;
- eliminação do estrato de solo vegetal mais superficial.

3.3.4. Modelos representativos dos perfis estratigráficos de solo

Para a geração estatística de perfis estratigráficos (sintéticos), são considerados os modelos estratigráficos propostos por Malheiro e Nunes (2007). A adopção destes modelos, em detrimento dos outros apresentados, prende-se com o facto de terem constituído a base para a elaboração das colunas de solo no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010).

Da aplicação das hipóteses simplificativas aos modelos adoptados resulta um total de seis modelos de perfis estratigráficos, apresentados na Figura 3.6, em que o sexto tipo de coluna resulta da alteração do material constituinte do primeiro estrato do perfil de Tipo 1 (Traquito) por um novo material (Ignimbrito).

Os modelos apresentados encontram-se sobrepostos num material designado como substrato rochoso sendo consideradas propriedades presentes no Quadro 3.2, para este material.

Quadro 3.2 – Propriedades do material que constitui o substrato rochoso para os perfis estratigráficos para o Arquipélago dos Açores

Material	ρ_{\min} [t/m ³]	$v_{s\min}$ [m/s]	$v_{s\max}$ [m/s]	Índice plasticidade [%]
Basalto (Maciço)	3,0	1000	3300	Não se Aplica

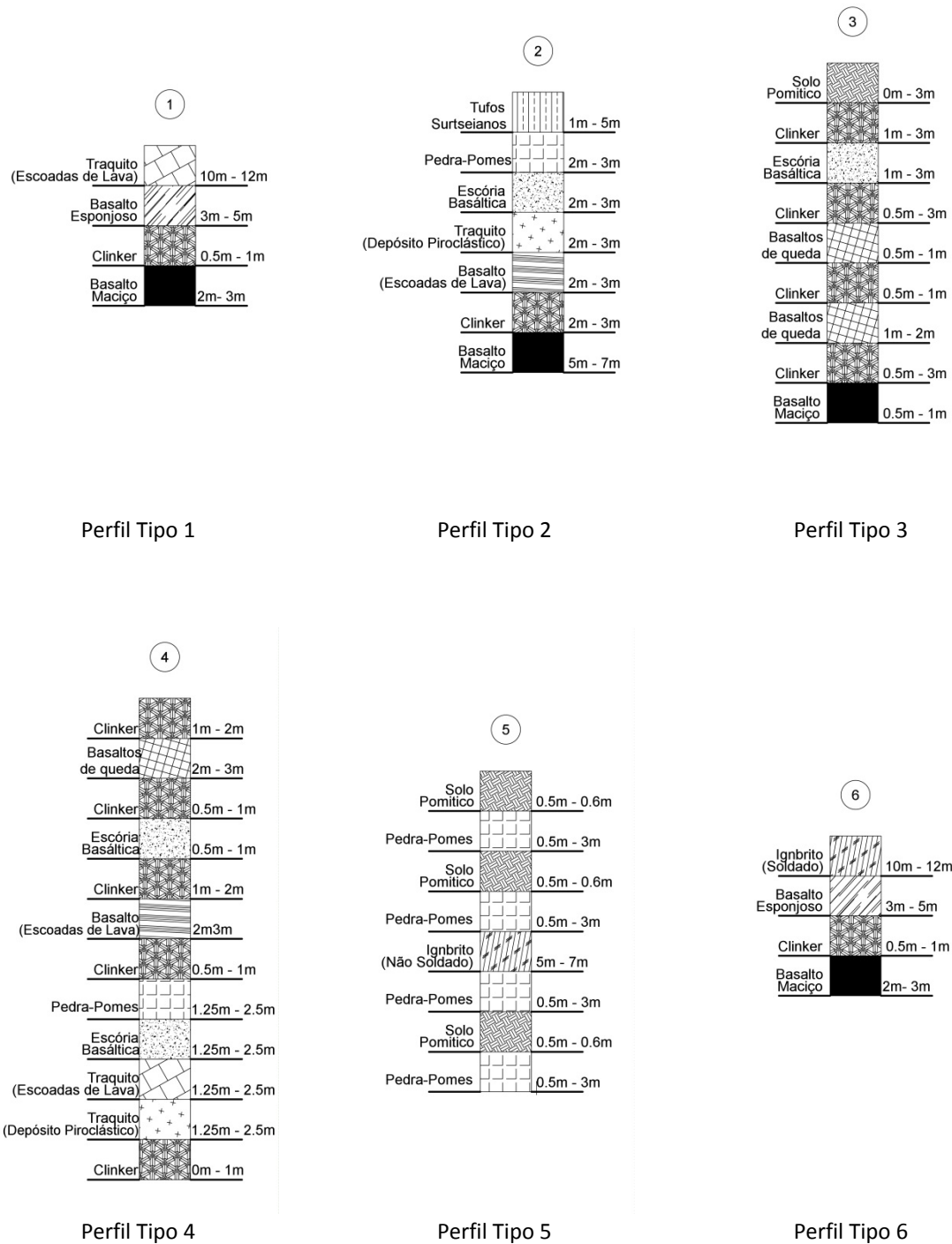


Figura 3.6 – Modelos de perfis estratigráficos para a Região Autónoma dos Açores

Conforme é possível observar, a cada elemento do perfil estratigráfico encontra-se associado um intervalo de variação da espessura, variável geométrica indispensável para a pretendida definição espectral do movimento a partir da propagação de ondas S . Esta dispersão assim quantificada permite a geração aleatória de valores de espessura para cada um dos estratos dos modelos.

O resumo do número de estratos nos diversos modelos de perfis, assim como do intervalo de variação possível para a sua espessura encontram-se no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Número de estratos, espessuras mínimas, máximas e intervalos de valores de espessuras para cada estrato dos perfis

	Perfil Tipo 1		Perfil Tipo 2		Perfil Tipo 3		Perfil Tipo 4		Perfil Tipo 5		Perfil Tipo 6	
Espessura (m)	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Nº de estratos	4		7		10		12		8		4	
Espessura mínima	15,5		16		6		12,5		8,5		15,5	
Espessura máxima	21		27		23		24		20,8		21	
Estrato 1	10	12	1	5	0	3	1	2	0,5	0,6	10	12
Estrato 2	3	5	2	3	1	3	2	3	0,5	3	3	5
Estrato 3	0,5	1	2	3	1	3	0,5	1	0,5	0,6	0,5	1
Estrato 4	2	3	2	3	0,5	3	0,5	1	0,5	3	2	3
Estrato 5	-	-	2	3	0,5	1	1	2	5	7	-	-
Estrato 6	-	-	2	3	0,5	1	2	3	0,5	3	-	-
Estrato 7	-	-	5	7	1	2	0,5	1	0,5	0,6	-	-
Estrato 8	-	-	-	-	0,5	3	1,25	2,5	0,5	3	-	-
Estrato 9	-	-	-	-	0,5	1	1,25	2,5	-	-	-	-
Estrato 10	-	-	-	-	-	-	1,25	2,5	-	-	-	-
Estrato 11	-	-	-	-	-	-	1,25	2,5	-	-	-	-
Estrato 12	-	-	-	-	-	-	0	1	-	-	-	-

A consideração de estratos que apresentam uma espessura reduzida (inferior a 1 m) justifica-se com o facto de estes representarem separações, significativas, entre eventos vulcânicos ou erosivos, sendo relevante uma avaliação dos efeitos que tais estratos induzem no comportamento global coluna de solo face a eventos sísmicos.

Para os modelos elaborados no decurso do presente estudo é ainda possível a identificação de perfis de propriedades (massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade) do que resulta uma maior sensibilidade no que diz respeito à variação das propriedades, para os terrenos simulados, Figuras 3.7a a 3.7f.

As propriedades dos guiarão o processo de identificação de um dos perfis aqui gerados com um perfil resultante de uma sondagem num local, por forma a definir a lei de atenuação que melhor se ajustará ao local de prospecção.

Na identificação de um dos perfis, com o perfil de uma sondagem, deve ser admitida uma flutuação dos valores, com base nos valores dos coeficientes de variação médios do tipo de propriedade representada. Este valor é obtido através do cálculo do valor médio dos demais coeficientes de variação dos materiais, sendo estes obtidos segundo a expressão (3.3), em que σ representa o desvio padrão da amostra e μ o valor médio da amostra.

$$c_v = \sigma / \mu \quad (3.3)$$

No Quadro 3.4 são apresentados os valores dos coeficientes de variação, de cada uma das propriedades (ρ e V_s), relativos a cada um dos materiais e ainda o valor médio, a admitir para uma flutuação dos valores do perfil, para cada uma das propriedades.

Quadro 3.4 – Coeficiente de variação para os diferentes materiais presentes nos solos

Material	Cv, ρ (%)	Cv, V_s (%)
Pedra-Pomes	3%	10%
Ignimbritos (Não Soldados)	14%	16%
Tufos Surtseianos	7%	24%
Escória Basáltica	1%	10%
Basaltos de queda (depósito)	2%	14%
Ignimbritos (Soldados)	3%	6%
Solos Pomíticos	2%	10%
Traquitos (Depósito Piroclástico)	3%	10%
Traquitos (Escoadas de Lava)	2%	15%
Clinker	2%	18%
Basalto (Escoadas de Lava)	2%	18%
Basalto (Maciço)	2%	18%
Basalto Vesicular (Escoadas de Lava)	7%	10%

Apresenta-se nas figuras 3.7a a 3.7f os conjuntos de perfis de variação (da densidade média do material, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade) de cada um dos tipos de perfil propostos.

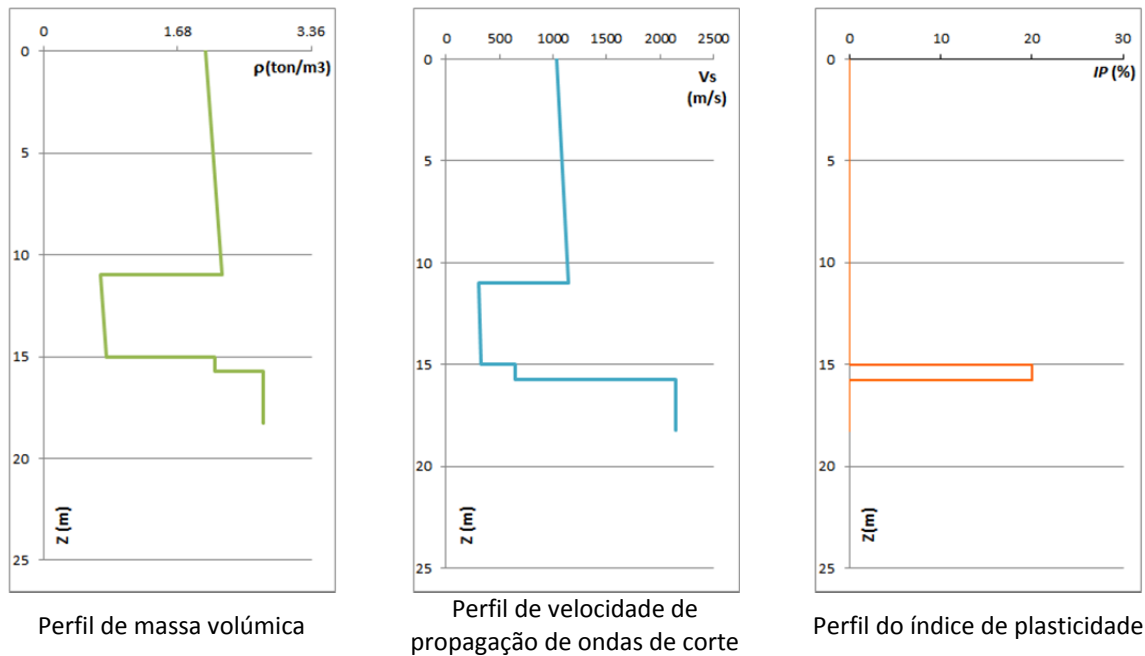


Figura 3.7 a – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 1.

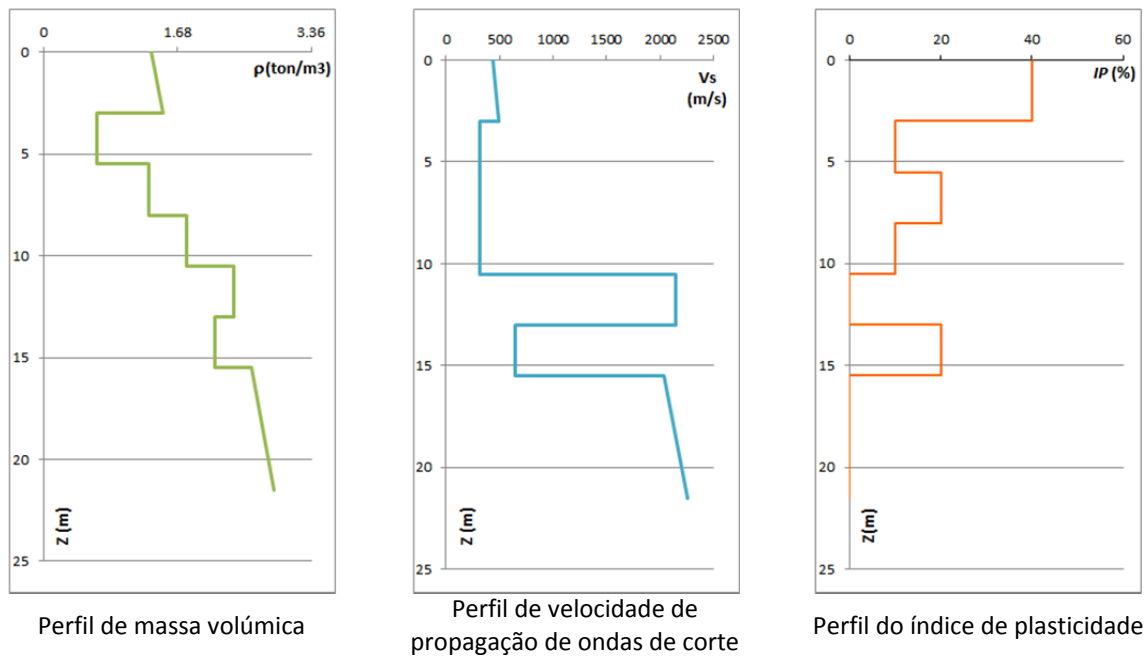


Figura 3.7 b – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 2.

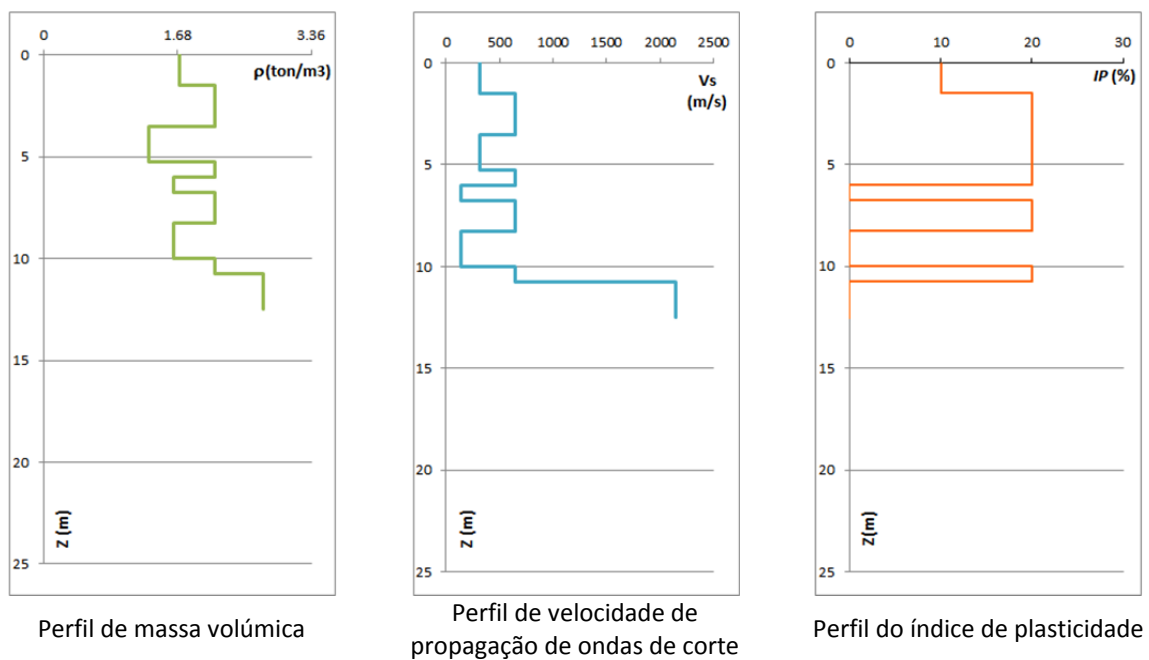


Figura 3.7 c – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 3.

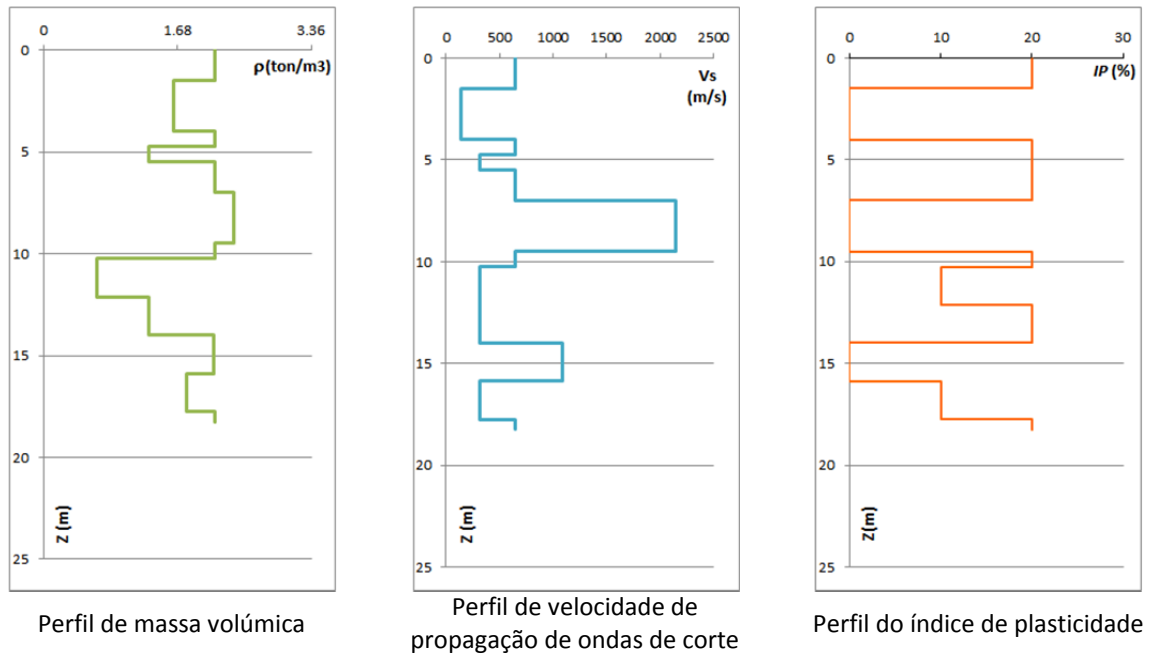


Figura 3.7 d – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 4.

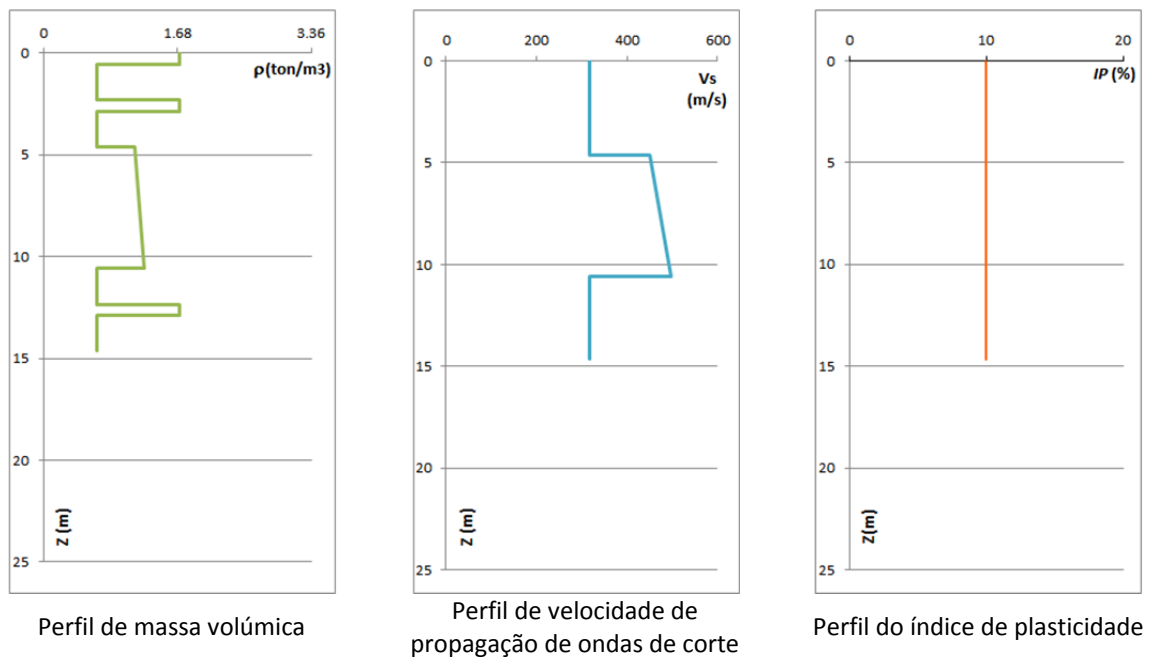


Figura 3.7 e – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 5.

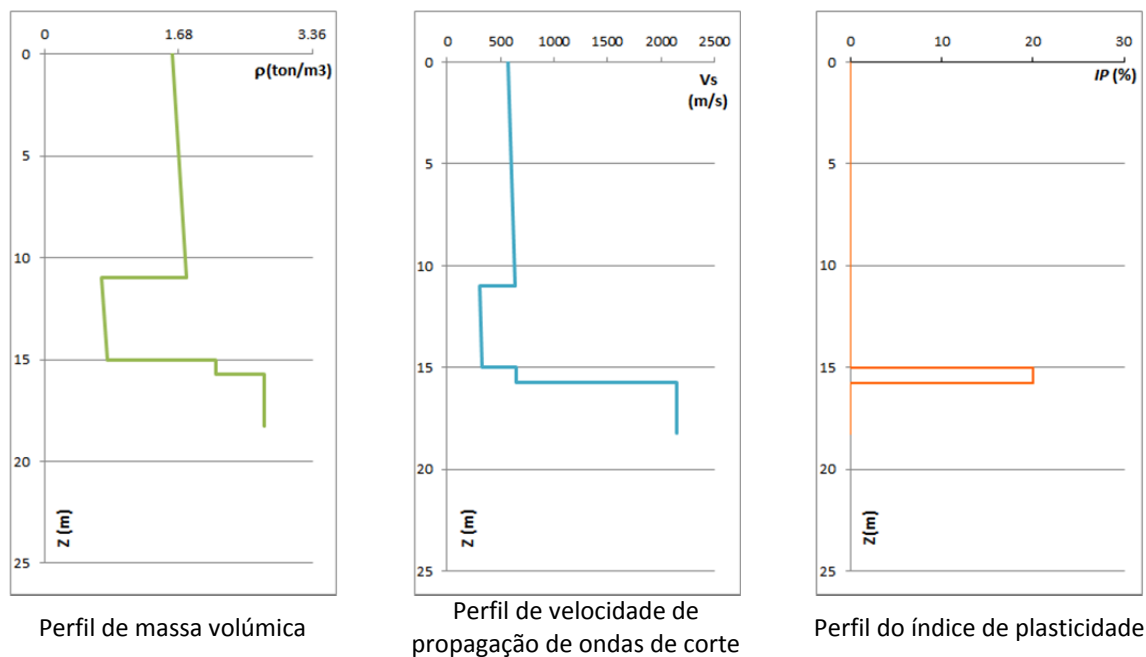


Figura 3.7 f – Perfis de massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte e índice de plasticidade para perfil de tipo 6.

3.4. Comparação com os Modelos Existentes

Uma vez elaborados os modelos de perfis estratigráficos é essencial efectuar-se uma comparação com os modelos de base existentes, e apresentados em 3.2.2, e avaliar as diferenças verificadas.

Comparativamente aos modelos propostos por Malheiro e Nunes (2007) verifica-se a remoção de estratos referentes a paleossolos, cuja espessura era reduzida, sendo também notória a não consideração do nível freático no perfil de tipo 1. Os modelos, de perfis, elaborados aproximam-se assim dos modelos propostos para a região, presentes no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010).

Relativamente aos modelos presentes em Teves-Costa e Veludo (2013) verifica-se que em termos de composição de materiais, estes se aproximam ao modelo de perfil de tipo 2, que corresponde ao perfil para Angra do Heroísmo (Sé) (Malheiro e Nunes, 2007). Confirma-se a ocorrência dos mesmos materiais na mesma sequência salientando-se, no entanto, a supressão de alguns estratos de material, nomeadamente o clinker e a escória basáltica e falta de correspondência da espessura de alguns estratos, nomeadamente os relativos à Pedra-Pomes.

3.5. Geração de Perfis Estratigráficos Sintéticos

Toda a informação, que complementa base de dados de propriedades geotécnicas dos terrenos, representa dados imprescindíveis para a geração de perfis estratigráficos sintéticos. É, no entanto, necessária uma metodologia para garantir a coerência com a variabilidade dos terrenos da região.

A adopção dos modelos de colunas de solo permite que se defina o modo como os materiais geológicos se encontram dispostos, assim como os valores possíveis para a variação das espessuras dos diferentes estratos.

Em cada um dos perfis estratigráficos gerados a espessura de cada estrato é definida, aleatoriamente, dentro de um intervalo de variação possível e o material constituinte de cada estrato encontra-se caracterizado pelas suas propriedades (massa volúmica, velocidade de propagação de ondas de corte, e índice de plasticidade prescrito). O índice de plasticidade (do material) permite definir as equações da curva de degradação do módulo de corte secante, G_{sec} , e da curva de variação da fracção de amortecimento crítico, ξ , ambas em função da distorção, para a aplicação do método linear equivalente.

3.5.1. Metodologia para a geração dos perfis sintéticos

Para a geração de perfis sintéticos é seleccionado o modelo tipo a utilizar, um dos presentes na Figura 3.6, de modo a definir as sequências estratigráficas litológicas, e materiais constituintes, assim como os valores máximos e mínimos admissíveis para as espessuras dos estratos.

Em cada estrato o valor de cada grandeza, à excepção do índice de plasticidade, é definido a partir de uma soma do limite inferior do intervalo com uma percentagem aleatória, da amplitude de variação, sendo esta obtida pela geração de um número aleatório, no intervalo $[0, 1]$, com distribuição estatística uniforme. A adopção desta distribuição deve-se a uma tentativa de evitar a concentração, muito acentuada, das propriedades geradas em torno de um valor médio.

A geração de um perfil estratigráfico sintético é realizada gerando-se valores de propriedades de materiais e de espessuras, tendo em consideração os intervalos de variação apresentados anteriormente (Quadro 3.1 e Quadro 3.3 respectivamente), para o modelo tipo utilizado, e utilizando-se para o efeito a expressão (3.4),

$$Prop_i = Prop_{Mínimo} + \alpha_{Aleatório} \times [Prop_{Máximo} - Prop_{Mínimo}] \quad (3.4)$$

em que $Prop_i$ representa o valor atribuído à grandeza em estudo, $Prop_{Mínimo}$ e $Prop_{Máximo}$ correspondem, respectivamente, aos limites mínimo e máximo do intervalo, e $\alpha_{Aleatório}$ o número aleatório uniforme padrão ($0 \leq \alpha_{Aleatório} \leq 1$).

Todo o processo de geração da uma coluna é independente dos restantes, pelo que para a simulação de um dado número, n , de colunas de um dado modelo serão gerados novos valores de espessuras e de propriedades de materiais para cada uma dessas colunas.

3.5.2. Aplicação da metodologia para a geração de colunas de solo sintéticas

De forma a solucionar o problema já referido, da falta de registos referentes a colunas de solo que impossibilita uma avaliação dos efeitos à superfície através da aplicação do modelo linear equivalente, é aplicada a metodologia apresentada para a geração de registos sintéticos de colunas de solo.

Para o efeito são geradas 200 unidades de perfis para cada um dos tipos de colunas presentes nos modelos elaborados no presente estudo, 3.3.4, perfazendo um total de 1200 perfis, correspondentes aos seis tipos de perfis estratigráficos.

Aos perfis gerados contabilizam-se ainda a geração de 51200 propriedades de materiais pretendendo-se que o conjunto total de dados seja representativo dos terrenos mais superficiais da região.

3.6. Comentários Finais

Em regiões com génese vulcânica a estratigrafia dos solos, assim como os materiais presentes, encontram-se altamente condicionados pelas sucessões de eventos vulcânicos que ocorreram, originando sequências estratigráficas bastante peculiares que podem ainda apresentar ligeiras variações consoante a localização relativa à estrutura vulcânica, activa, no momento da formação dos terrenos.

As informações recolhidas no presente estudo resultaram na elaboração de uma base de dados que contém intervalos de variação dos valores, para as diferentes propriedades dos materiais existentes nos solos da região, permitindo a utilização destes materiais em colunas de solo sintéticas com vista à aplicação do método linear equivalente para a simulação de eventos sísmicos à superfície do terreno.

Os modelos de colunas de solo elaborados no presente estudo constituem aproximações à estrutura dos solos da região, permitindo a geração de perfis sintéticos, através da aplicação de metodologias estocásticas aos modelos apresentados.

A geração de perfis estratigráficos sintéticos, com base nos modelos elaborados, permite que se constitua um conjunto de 1200 perfis sintéticos, que se pretende serem representativos dos terrenos mais superficiais da região dos Açores.

O conjunto de perfis gerado permite a aplicação do modelo linear equivalente a cada uma das colunas, possibilitando assim a simulação da resposta do terreno face a acções sísmicas na região.

4. Simulação de Movimentos Sísmicos Superficiais e Equações de Previsão de Movimentos

4.1. Introdução

A amplitude dos movimentos intensos do solo em eventos futuros é geralmente estimada usando leis de atenuação, mais adequadamente denominadas de equações (empíricas) de previsão da amplitude dos movimentos do solo (*EPMS*).

Estas equações, com um conjunto de coeficientes ajustados através de regressões multi-lineares com base no método de mínimos quadrados, permitem estimar aquela amplitude em função de variáveis explicativas como o tipo de mecanismo de falha, a magnitude, a distância, e por vezes o tipo de terrenos superficiais. É ainda incluído uma variável explicativa do desvio entre os resultados observados e os resultados estimados correspondentes.

De acordo com recomendações para a análise probabilística da perigosidade sísmica (p. ex. SSHAC, 1997), a elaboração dos estudos de perigosidade sísmica deve ser efectuada considerando-se leis espectrais de previsão e não apenas um valor de pico do movimento sísmico, como por exemplo a PGA ou a PGV.

A recomendação é baseada no facto da abordagem espectral ser a única capaz de captar a contribuição das várias fontes sísmicas para a perigosidade nas gamas de frequência dos diferentes sistemas estruturais. Esta abordagem implica, no entanto, um estudo de perigosidade sísmica para uma gama relevante de frequências e dos movimentos do solo gerados por sismos de magnitude mínima de 5,5.

A inexistência de registos com as magnitudes de interesse em Portugal e, em particular no Arquipélago dos Açores, impossibilita o desenvolvimento de tais leis espectrais de atenuação a partir de regressões efectuadas sobre dados reais. Assim, a previsão da amplitude dos movimentos intensos do solo para o nosso País tem sido realizada com recurso a:

- a) relações com a intensidade macrossísmica como variável dependente nos modelos de atenuação, o que impossibilita o estudo espectral e obriga à utilização de leis empíricas para a conversão das intensidades macrossísmicas em parâmetros de movimento do solo tradicionalmente limitados à PGA ou à PGV;
- b) relações de carácter empírico validadas noutras regiões, mas que não permitem uma avaliação quantitativa dos erros cometidos, devido à falta de registos.

Da falta de um julgamento quantitativo das leis utilizadas, pelo menos para a gama de magnitudes e de distâncias de interesse, resulta que a perigosidade sísmica é frequentemente analisada apenas em termos de PGA, estando a decisão de utilizar um dado modelo em detrimento de outro sujeita à sensibilidade do autor de cada estudo, o que se traduz em incertezas importantes nos resultados numéricos obtidos em cada estudo.

Seguindo a recomendação SSHAC (1997), é possível a utilização de modelos de base sismológica para a obtenção dos valores espectrais de aceleração, quando a falta de registos numa região inviabiliza uma compreensão credível da acção sísmica. Neste contexto foram desenvolvidos anteriormente para Portugal Continental (Carvalho, 2007; Carvalho *et al.*, 2008) modelos estocásticos não-estacionários, que consideram os processos físicos de geração e propagação da energia sísmica desde a fonte até ao local, contemplando a geometria da falha, o processo de rotura na fonte sísmica e as características de impedância do meio de propagação.

No âmbito do projecto SiGMA foi recentemente realizado um estudo (Carvalho e Reis, 2014) para o conhecimento desses processos na região dos Açores, tendo sido obtidos os parâmetros necessários para caracterização do modelo estocástico de falha-finita, permitindo assim a simulação dos movimentos sísmicos intensos em substrato rochoso para o Arquipélago dos Açores.

A utilização destes modelos permitiu a simulação de movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências de interesse, criando-se uma base de dados constituída por registos sintéticos, desejavelmente representativos dos movimentos sísmicos em firme rochoso no Arquipélago dos Açores, amenizando deste modo as lacunas regionais.

É neste momento pertinente referir que o método estocástico tem sido usado para estimar leis de atenuação para diferentes regiões (Boore e Atkinson, 2006; Toro *et al.*, 1997 e Atkinson e Silva, 2000), tendo Carvalho (2007) concluído que a metodologia estocástica constitui uma metodologia robusta para a previsão das amplitudes de movimentos do solo, para magnitudes entre 4 e 8 e para distâncias focais até centenas de quilómetros.

As simulações efectuadas no decurso do projecto SiGMA tiveram em conta as heterogeneidades na ruptura, a captação dos efeitos de directividade e a consideração da componente aleatória, das incertezas dos parâmetros do modelo estocástico de falha-finita, resultando uma base de dados que contempla 18 magnitudes combinadas com 550 distâncias hipocentrais, das quais resulta um total de 9900 eventos simulados. Estas simulações permitiram, como apresentado neste capítulo, a elaboração de leis espectrais de atenuação para o afloramento rochoso da região dos Açores.

De modo a considerar a influência do terreno local nos movimentos superficiais, são utilizadas as colunas de solo sintéticas apresentadas no capítulo 3, para cada tipo de terreno preconizado no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010) e que perfazem um total de 1200 registos estocásticos, sendo pretendido que o conjunto de colunas de solo represente a variabilidade dos solos existentes na região.

A simulação dos movimentos à superfície do terreno é efectuada considerando a propagação das ondas sísmicas desde o substrato rochoso, tendo sido adoptados o modelo simplificado de propagação vertical de ondas S com polarização horizontal associado a uma coluna estratigráfica (já apresentado no capítulo 2), para o qual se tem como interface inferior um semi-espaco elástico rochoso, e o método linear equivalente para a avaliação da resposta sísmica não linear dos solos (Serra e Caldeira, 1997).

O resultado das simulações é uma base de dados sintética de registos de movimentos horizontais sísmicos à superfície, para uma gama de frequência, magnitude e distâncias hipocentrais de interesse para a engenharia. Estas frequências, apresentadas no Quadro 4.1, contemplam as frequências fundamentais do parque habitacional dos Açores (1 – 10 Hz) (Teves-Costa *et al.*, 2004; Maia, 2011) assim como frequências fundamentais encontradas para diversos tipos de terreno (0,52 – 7 Hz) (Teves-Costa *et al.*, 2004; Teves-Costa e Veludo, 2013; Maia, 2011).

Quadro 4.1 – Conjunto de frequências para análise [Hz]

0,17	0,24	0,33	0,52	0,95	1,28	1,67	1,96	2,44	3,33	4,17
5	5,88	6,25	6,67	10	12,5	14,29	16,67	20	33,33	50

A base de dados de movimentos horizontais sísmicos à superfície resultante das simulações destina-se à elaboração de equações de previsão dos movimentos sísmicos superficiais para o Arquipélago dos Açores, com a consideração de termos não lineares para os diferentes tipos de terreno caracterizados no Anexo Nacional do EC8 (NP EN 1998-1, 2010).

4.2. Simulação de Movimentos Intensos à Superfície do Solo

A simulação de movimentos à superfície de um terreno, modelado por um perfil estratigráfico sobrejacente a um substrato rochoso, é um processo complexo que se encontra dependente da acção sísmica ao nível do substrato assim como das características de impedância do perfil, dado que o comportamento não linear dos materiais constituintes exerce influência na propagação da energia sísmica.

Para esse efeito recorre-se à base de dados relativa à acção sísmica elaborada no decurso do projecto SiGMA, que contém espectros de aceleração horizontal para substrato rochoso, resultantes de simulações de eventos sísmicos. Estas simulações foram realizadas com a utilização dos modelos de falha finita (Carvalho, 2007; Carvalho *et al.*, 2008) e os parâmetros regionais (Carvalho e Reis, 2014), encontrando-se simulados eventos com magnitudes compreendidas entre 4,1 e 7,5, com incrementos de 0,2, e para distâncias hipocentrais a variar entre 1 e 400 km.

Na simulação dos efeitos sísmicos considerando os terrenos superficiais e contemplando a sua contribuição para efeitos de propagação da energia sísmica, é utilizada a base de dados relativa aos perfis estratigráficos sintéticos para a região dos Açores, apresentados no capítulo 3.

A avaliação da resposta sísmica dos perfis é efectuada com recurso ao modelo linear equivalente, o qual considera os efeitos não lineares do solo ao fazer depender os parâmetros fracção de amortecimento crítico (ξ) e módulo secante de rigidez de corte (G) da distorção sofrida por cada camada (γ). A determinação dos parâmetros (ξ e G) permite a obtenção da função de resposta complexa, $H(\omega)$, traduzindo assim a transferência de aceleração entre a base e o topo do perfil, possibilitando o cálculo da resposta deste aquando a ocorrência de uma acção sísmica na sua base, uma vez esta definida por um espectro de potência $S_a(\omega)$ (Serra e Caldeira, 1997).

Para a obtenção do espectro de potência da resposta de um perfil de solo, constituída por camadas de material sobrepostas horizontalmente, o procedimento para a obtenção da resposta é semelhante, ao já apresentado anteriormente no capítulo 2, somente a função de transferência da coluna é o resultado da multiplicação (concatenação) das várias funções de transferência, correspondentes às várias camadas, de acordo com a expressão (4.1),

$$H(\omega) = \prod_{i=1}^n H_i(\omega) \quad (4.1)$$

em que n é o numero total de camadas, ou estratos, do perfil e $H_i(\omega)$ a função de transferência entre a base e o topo da camada i na frequência ω .

O espectro de potência no topo do perfil, $S_R(\omega)$, resulta da multiplicação do espectro de potência do evento (para substrato rochoso) pela função de transferência e pela sua conjugada, $H(\omega)$ e $\overline{H(\omega)}$ respectivamente, tal como apresentado na expressão (2.18).

$$S_R(\omega) = H(\omega) S_a(\omega) \overline{H(\omega)} \quad (2.18)$$

De forma a efectuar uma análise do conjunto total de dados, e também permitir a sua introdução no Simulador de Cenários Sísmicos LNECLoss (Campos Costa *et al.*, 2004), foi desenvolvida uma rotina de cálculo, “Geradados”, com base na rotina de propagação de efeitos sísmicos em colunas de solo por meio de uma abordagem estocástica apresentada por Serra e Caldeira (1997). Esta rotina, que serviu de base ao desenvolvimento da “Geradados”, integra o simulador e efectua o cálculo da função de transferência de aceleração considerando a propagação vertical de ondas de corte através de uma coluna de solo.

No desenvolvimento da rotina foi utilizada a linguagem Fortran 90. O seu funcionamento consiste no cálculo da função de transferência para uma coluna de solo actuada na base por um movimento sísmico definido por um espectro de potência, avaliando a propagação vertical dos deslocamentos causada pela propagação de ondas de corte. Como resultado tem-se a obtenção do espectro de potência de aceleração superficial e, a partir deste, o correspondente espectro de resposta para um oscilador localizado no topo da coluna de solo com fracção de amortecimento crítico de 5%.

O funcionamento da rotina “Geradados” encontra-se ilustrado no esquema apresentado na Figura 4.1.

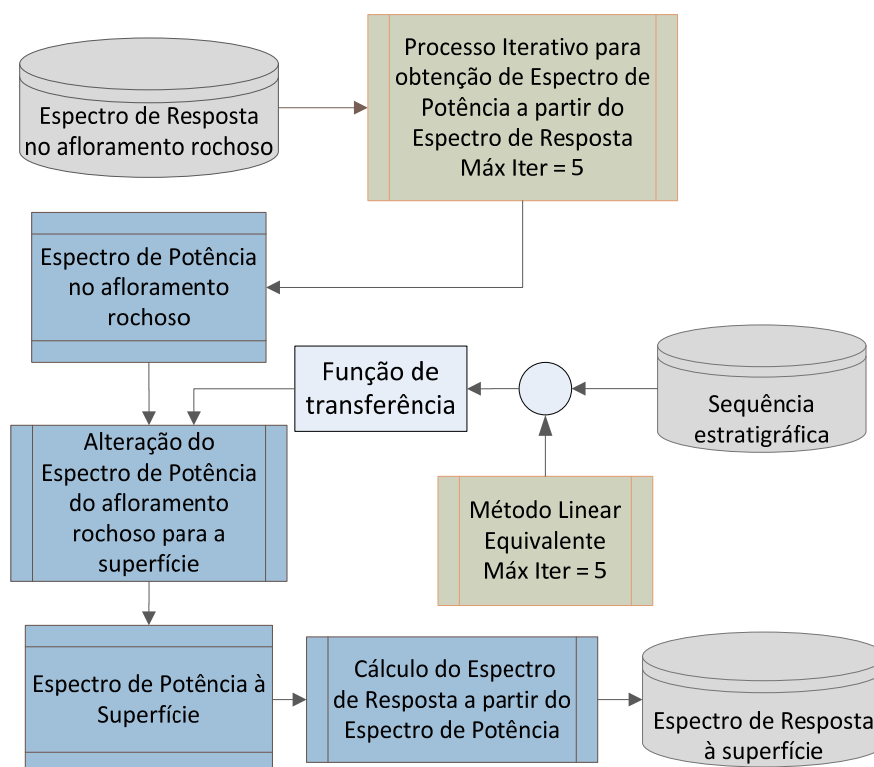


Figura 4.1 – Fluxograma do funcionamento da rotina “Geradados”.

A aplicação da rotina de cálculo aos perfis estratigráficos sintéticos elaborados para a região dos Açores, em conjunto com a base de dados de espectros de aceleração para substrato rochoso, visa a mitigação das lacunas existentes na base de dados de espectros de aceleração à superfície, contemplando os vários tipos de terreno considerados.

A base de dados de espectros de aceleração à superfície, agora desenvolvida, contempla as magnitudes e distâncias hipocentrais presentes na base de dados de espectros de resposta de aceleração, elaborada no projecto SiGMA, e será utilizada para a obtenção dos coeficientes que permitem definir equações de previsão de movimentos para os vários tipos de solo da região dos Açores.

4.3. Tratamento Estatístico da Base de Dados

A base de dados de espectros de aceleração à superfície resultante das simulações efectuadas para os perfis estratigráficos, não é excepção ao problema da incerteza dos resultados e como tal devem ser tomadas precauções que visem uma redução do erro cometido, podendo tal ser concretizado na forma de redução da dispersão do conjunto de dados.

Dado que as simulações são realizadas para um conjunto de 200 perfis estratigráficos em associação com uma excitação sísmica na base, estando esta caracterizada por um par Magnitude/Distância Hipocentral, faz sentido que qualquer tratamento estatístico que vise a redução da heterogeneidade do conjunto incida sobre conjuntos de 200 espectros, relativos à mesma acção sísmica.

Para a redução da dispersão, do conjunto de dados adoptou-se uma abordagem que consiste no cálculo de um índice baseado na intensidade espectral de cada um dos espectros, seguida da sua ordenação por ordem crescente do referido índice e eliminação de uma percentagem de espectros.

O cálculo da intensidade espectral como índice de comparação prende-se com a necessidade de se dispor de um parâmetro que permita controlar a heterogeneidade e efectuar a comparação entre espectros, sendo que o modo de cálculo é concretizado na forma de uma soma de várias parcelas, expressão (4.2), em que cada uma correspondente a uma área infinitesimal sob o espectro no intervalo $(T_{i+1} - T_i)$,

$$Int_{espectro} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A(T_{i+1}) + A(T_i)}{2} \right) (T_{i+1} - T_i) \quad (4.2)$$

em que $A(T_i)$ e $A(T_{i+1})$ correspondem às ordenadas do espectro para os períodos T_i e T_{i+1} , respectivamente.

Com a ordenação dos espectros em ordem crescente segundo o índice ($Int_{espectro}$), pretende-se que cada conjunto de 200 espectros seja compatível com uma distribuição de probabilidade, permitindo assim a eliminação dos valores que representam *outliers* extremos do conjunto com vista à redução da dispersão associada. Foi também considerado que o método aplicado deve ser igual para todos os cenários analisados, não podendo por isso ser dependente da acção sísmica.

Como critério de eliminação de *outliers* foram testados os quantilhos bilaterais simétricos de probabilidade 1%, 5% e 10% (cf. o exemplo da Figura 4.2, referente a uma distribuição de probabilidade Gaussiana e ao quantilho bilateral de 5%). Da análise efectuada à ordenação por intensidade espectral e percentagem de espectros a eliminar foi verificado que a maior redução de dispersão, do conjunto, é correspondente ao quantilho de 5%.

Assim, o valor de 5% foi considerado como valor aceitável para a remoção de registos, resultando num total de 10 registos eliminados (5 de $Int_{espectro}$ muito baixo e 5 de $Int_{espectro}$ muito alto) para um conjunto de 200 registos, resultando na redução da dispersão do conjunto sem, no entanto, colocar em causa a representatividade da variabilidade dos solos simulados, para a região dos Açores.

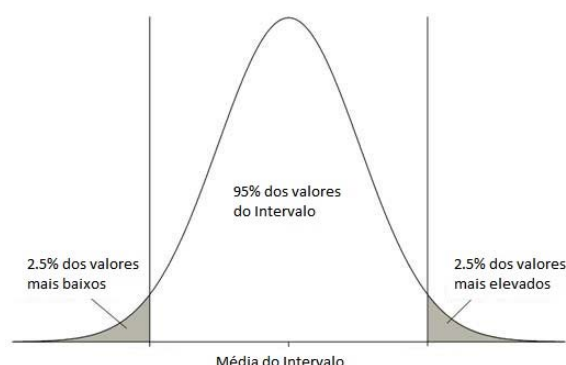


Figura 4.2 – Truncatura do quantilho bilateral de 5% para uma distribuição Gaussiana.

4.3.1. Validação da metodologia para tratamento estatístico dos dados

De modo a testar até que ponto a metodologia adoptada para o tratamento estatístico dos dados produz resultados que justifiquem a sua utilização, foram seleccionados aleatoriamente dois conjuntos de espectros de resposta aos quais se aplicou a metodologia proposta.

Os conjuntos analisados são constituídos por espectros de aceleração à superfície para terrenos do tipo 2 e 4, depois de solicitadas por um movimento horizontal causado por um evento de magnitude 6,2 e uma distância hipocentral de 117km.

Após avaliação de *outliers*, e da consideração do quantilho bilateral de 5% para a percentagem de registos a eliminar (Figura 4.2), o resultado da diminuição da dispersão, é comprovado pela redução do valor do desvio padrão e do coeficiente de variação relativo ao índice de intensidade dos espectros, presente nos Quadro 4.2 e Quadro 4.3, embora a média do conjunto permaneça quase inalterável.

Quadro 4.2 – Caracterização estatística da Amostra, (perfil do tipo 2) antes e após remoção de *outliers*

	Antes da remoção	Após remoção
Dimensão da amostra	200	190
Média, μ	188,411	188,412
Desvio Padrão, σ	7,304	6,286
Coef. de variação, σ/μ	3,9%	3,3%

Quadro 4.3 – Caracterização estatística da Amostra, (perfil do tipo 4) antes e após remoção de *outliers*

	Antes da remoção	Após remoção
Dimensão da amostra	200	190
Média, μ	38,62	38,611
Desvio Padrão, σ	2,043	1,811
Coef. de variação, σ/μ	5.3%	4.7%

Tendo-se verificado os que a metodologia aplicada resulta numa redução na dispersão do conjunto, na mesma ordem de grandeza para ambos os tipos de solo, conclui-se que a metodologia proposta em combinação com o quantilho bilateral de 5%, constitui uma abordagem fiável para o tratamento estatístico e redução da dispersão dos dados relativos aos espectros de aceleração à superfície, que resulta das simulações efectuadas no decorrer do presente trabalho.

4.4. Equações de Previsão dos Movimentos Intensos do Solo

A relação funcional que pretende traduzir da amplitude dos movimentos sísmicos superficiais num dado local deve seguir uma forma genérica, como p. ex. a apresentada na expressão (4.3).

$$\log Y = f(M, R, P) + \varepsilon \quad (4.3)$$

sendo:

- Y a intensidade do movimento do solo que se pretende prever (exemplo: ordenada espectral, valor de pico da aceleração, da velocidade ou do deslocamento);
- M magnitude do evento sísmico;
- R a distância hipocentral entre a fonte sísmica e o local;
- P parâmetros que podem caracterizar a fonte ou o local (exemplo: mecanismo focal da fonte sísmica ou condições geológicas locais);
- ε uma variável aleatória que reflecte a natureza imprevisível do movimento do solo e as características do modelo utilizado que se traduz numa dispersão em relação ao valor previsto pelo modelo de atenuação. Admite-se que esta variável tem distribuição normal de média nula e variância σ_ε^2 .

De modo a exprimir a dependência do movimento com as características do evento sísmico (magnitude e distância à fonte) e também com um parâmetro específico do local, como p. ex. o terreno superficial, foi adoptada a relação funcional do tipo

$$\log Y = c_1 + f_1(M) + f_2(R) + f_3(P) + \varepsilon \quad (4.4)$$

em que

- $f_1(M)$ considera a variação da amplitude do movimento do solo com a dimensão da rotura na fonte sísmica;
- $f_2(R)$ tem em conta a variação da amplitude do movimento do solo com a distância, do local à fonte sísmica, sendo composta, normalmente, por dois termos que consideram a atenuação geométrica (na qual $\log Y$ é proporcional a $\log R$) e a atenuação inelástica (em que $\log Y$ é proporcional a R);
- $f_3(P)$ representa a dependência relativamente às características da fonte e/ou efeitos locais e normalmente utiliza valores 0, 1 e 2 para as diferentes classes de terreno ou diferentes tipos de falhas. Actualmente, começam a aparecer expressões que traduzem os efeitos não lineares dos solos (Boore e Atkinson, 2006).

Na realização do presente estudo, foi adoptada a relação funcional apresentada na expressão (4.5) para as equações de previsão da média, geométrica, da componente horizontal da aceleração para a região dos Açores. A adopção desta relação prende-se não só por a mesma ter sido considerada com o mesmo propósito para Portugal Continental (Carvalho, 2007; Rodrigues *et al.*, 2014), mas também por contemplar a relação directa com a energia libertada na fonte (M) e a limitação da mesma para as altas magnitudes (M^2), assim como as parcelas relativas à variação da energia com a distância.

$$\log[A(f)] = C_1(f) + C_2(f)M + C_3(f)M^2 + C_4(f)\log R + C_5(f)R + \varepsilon \quad (4.5)$$

Foi também assumido que a relação funcional adquire a mesma forma para os diferentes tipos de terreno estudados, sendo obtida para um conjunto de frequências pré-definido, em que $A(f)$ é a ordenada espectral de aceleração em cm/s^2 , para a frequência, f , M representa a magnitude do evento, R é a distância hipocentral, em km, sendo ε o resíduo do modelo, com desvio padrão σ_ε .

Na definição da relação funcional adoptada tem-se as seguintes justificações para as variáveis explicativas dos movimentos sísmicos:

- M exprime a dependência directa da aceleração em função à energia libertada, esperando-se por isso que o coeficiente, $C_2(f)$ assumam valores positivos;
- M^2 tem como função a limitação dos valores do espectro para altas magnitudes, representando a observação real da saturação de aceleração para as altas magnitudes, esperando-se por isso que o coeficiente $C_3(f)$ assumam valores negativos, para que a parábola em M tenha concavidade negativa;
- $\log R$ exprime a atenuação geométrica, independente da frequência, reduzindo a amplitude espectral em função da distância, sendo de esperar que o coeficiente $C_4(f)$ tome valores negativos;
- R representa a atenuação inelástica ao longo de um percurso, sendo observado que a dissipação de energia aumenta exponencialmente com a frequência, (Anderson e Hough, 1994), esperando-se valores de $C_5(f)$ negativos.

4.4.1. Metodologia para estimativa dos coeficientes de atenuação

A estimativa dos coeficientes das equações de previsão dos movimentos intensos do solo efectua-se, habitualmente recorrendo a uma regressão multi-linear pelo método dos mínimos quadrados sobre os registos de uma base de dados de espectros de aceleração superficial, para determinada uma área geográfica.

Nesta dissertação a estimativa foi efectuada sobre as bases de dados sintéticas de aceleração em afloramento rochoso, e no topo dos perfis estratigráficos, para as frequências apresentadas anteriormente no Quadro 4.1. Como tal, são utilizados os dados referentes a magnitudes compreendidas entre 4,1 e 7,5 e a distâncias hipocentrais entre 1 e 400 km, resultando um total de 190 espectros de resposta de aceleração à superfície para cada um dos 9900 eventos sísmicos (18 magnitudes x 550 distâncias), caracterizados por pares Magnitude/Distância Hipocentral.

O processo para a obtenção dos coeficientes foi optimizado com o recurso a variáveis condicionais, ou variáveis “Dummy”, de modo a que numa única análise se obtenham os coeficientes para cada um dos perfis de solo, contemplados na base de dados relativa aos solos apresentando cada coeficiente (C_i) a forma da expressão (4.6 a).

As variáveis “Dummy” $\delta_{j,r}$ tomam o valor 1 quando o tipo de perfil corresponde ao tipo de perfil para o qual é calculada a regressão e 0 no caso contrário, de acordo com a expressão (4.6 b). $D_{i,r}$ corresponde ao coeficiente quando se considera o perfil de tipo r adicional ao $D_{i,0}$, este último representativo da variação espectral em afloramento rochoso (perfil de referência)

$$C_{i,r} = D_{i,0} + \sum_{j=1}^6 \delta_{j,r} \cdot D_{i,j} \quad (4.6 \text{ a})$$

$$\delta_{j,r} = \begin{cases} 1, & j = r \\ 0, & j \neq r \end{cases} \quad (4.6 \text{ b})$$

sendo i o índice do coeficiente, variando de 1 a 5, e r o tipo de terreno que varia de 1 a 6.

Para uma melhor compreensão do seu funcionamento apresenta-se, na expressão (4.7), um exemplo referente ao coeficiente C_1 para o perfil de tipo 2 ($C_{1,2}$).

$$C_{1,2} = D_{1,0} + D_{1,2} = D_{1,0} + 0 \cdot D_{1,1} + 1 \cdot D_{1,2} + 0 \cdot D_{1,3} + 0 \cdot D_{1,4} + 0 \cdot D_{1,5} + 0 \cdot D_{1,6} \quad (4.7)$$

4.4.2. Resultados obtidos

Os coeficientes, resultantes da análise estatística, permitiram definir equações de previsão de movimentos intensos para o afloramento rochoso e à superfície para os seis tipos de solo, já apresentados, para a região dos Açores.

Para o efeito são apresentados nos Quadro 4.4 a Quadro 4.10 os coeficientes obtidos para os vários tipos de perfil, assim como para as frequências espectrais já apresentadas no Quadro 4.1. Para referência, apresenta-se também no Quadro 4.4 os períodos espectrais respectivos a cada frequência.

Quadro 4.4 – Coeficientes da EPMS para afloramento rochoso

Período [s]	Frequência [Hz]	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	σ_ε
5.91	0,17	-8,5201	2,0699	-0,0787	-0,4564	-0,0031	0,2273
4.18	0,24	-8,6461	2,2166	-0,0941	-0,3827	-0,0035	0,2278
2.99	0,33	-8,8140	2,4473	-0,1222	-0,2620	-0,0043	0,2297
1.92	0,52	-8,3372	2,4531	-0,1302	-0,2255	-0,0048	0,2355
1.05	0,95	-7,0411	2,2687	-0,1261	-0,2066	-0,0056	0,2472
0.78	1,28	-5,9815	2,0261	-0,1105	-0,2255	-0,0060	0,2540
0.6	1,67	-4,9286	1,7622	-0,0921	-0,2443	-0,0063	0,2617
0.51	1,96	-4,2214	1,5776	-0,0786	-0,2631	-0,0066	0,2659
0.41	2,44	-3,3382	1,3443	-0,0613	-0,2915	-0,0068	0,2724
0.3	3,33	-2,1834	1,0375	-0,0380	-0,3462	-0,0072	0,2824
0.24	4,17	-1,5074	0,8588	-0,0240	-0,3929	-0,0074	0,2890
0.2	5	-0,9966	0,7265	-0,0134	-0,4430	-0,0075	0,2956
0.17	5,88	-0,7064	0,6569	-0,0078	-0,4877	-0,0075	0,2996
0.16	6,25	-0,5441	0,6202	-0,0047	-0,5195	-0,0075	0,3023
0.15	6,67	-0,4177	0,5932	-0,0024	-0,5510	-0,0075	0,3048
0.1	10	-0,0539	0,5374	0,0032	-0,7176	-0,0071	0,3147
0.08	12,5	-0,0819	0,5730	0,0011	-0,8152	-0,0067	0,3171
0.07	14,29	-0,2287	0,6256	-0,0027	-0,8668	-0,0064	0,3162
0.06	16,67	-0,3655	0,6648	-0,0056	-0,8849	-0,0063	0,3146
0.05	20	-0,6024	0,7244	-0,0099	-0,8916	-0,0061	0,3108
0.03	33,33	-1,5815	0,9032	-0,0233	-0,7378	-0,0059	0,2939
0.02	50	-1,6389	0,9120	-0,0240	-0,7250	-0,0060	0,2932

Quadro 4.5 – Coeficientes da EPMS para o perfil tipo 1

Frequência [Hz]	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	σ_ε
0,17	-7,8327	2,1244	-0,0871	-0,8472	-0,0021	0,2342
0,24	-8,0511	2,3020	-0,1049	-0,7770	-0,0024	0,2353
0,33	-8,3832	2,5270	-0,1296	-0,6708	-0,0030	0,2372
0,52	-7,9375	2,5664	-0,1425	-0,5765	-0,0038	0,2426
0,95	-6,7916	2,4184	-0,1407	-0,5340	-0,0048	0,2533
1,28	-5,7522	2,1829	-0,1255	-0,5426	-0,0052	0,2583
1,67	-4,6819	1,9217	-0,1072	-0,5615	-0,0056	0,2657
1,96	-4,0079	1,7528	-0,0949	-0,5746	-0,0059	0,2705
2,44	-3,1083	1,5112	-0,0767	-0,5688	-0,0063	0,2769
3,33	-2,0441	1,1975	-0,0532	-0,4665	-0,0072	0,2935
4,17	-1,3865	0,9639	-0,0372	-0,2884	-0,0078	0,3086
5	-0,6734	0,7026	-0,0208	-0,1392	-0,0078	0,2990
5,88	-0,3044	0,5727	-0,0119	-0,1523	-0,0075	0,2942
6,25	-0,2038	0,5351	-0,0086	-0,1993	-0,0074	0,2949
6,67	-0,1914	0,5280	-0,0072	-0,2596	-0,0072	0,2926
10	-0,4784	0,6059	-0,0098	-0,4513	-0,0067	0,2797
12,5	-0,6972	0,6644	-0,0135	-0,4859	-0,0065	0,2781
14,29	-0,7902	0,6895	-0,0151	-0,5006	-0,0064	0,2776
16,67	-0,8271	0,6997	-0,0158	-0,5079	-0,0064	0,2774
20	-0,8592	0,7093	-0,0163	-0,5167	-0,0064	0,2773
33,33	-0,8457	0,7119	-0,0163	-0,5392	-0,0062	0,2783
50	-0,8202	0,7069	-0,0159	-0,5434	-0,0062	0,2783

Quadro 4.6 – Coeficientes da EPMS para o perfil tipo 2

Frequência [Hz]	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	σ_ε
0,17	-7,7791	2,1205	-0,0867	-0,8735	-0,0020	0,2348
0,24	-8,0084	2,2977	-0,1045	-0,7961	-0,0024	0,2357
0,33	-8,3458	2,5209	-0,1291	-0,6831	-0,0030	0,2375
0,52	-7,9071	2,5565	-0,1418	-0,5780	-0,0038	0,2424
0,95	-6,8053	2,4067	-0,1400	-0,5091	-0,0048	0,2519
1,28	-5,7943	2,1689	-0,1248	-0,5004	-0,0053	0,2561
1,67	-4,7299	1,9025	-0,1063	-0,5126	-0,0056	0,2626
1,96	-4,0372	1,7279	-0,0938	-0,5327	-0,0058	0,2665
2,44	-3,0512	1,4735	-0,0749	-0,5694	-0,0061	0,2709
3,33	-1,6865	1,1366	-0,0494	-0,6488	-0,0064	0,2803
4,17	-0,8055	0,9321	-0,0337	-0,7112	-0,0066	0,2911
5	-0,1110	0,7710	-0,0212	-0,7259	-0,0069	0,3119
5,88	0,2735	0,6763	-0,0142	-0,6866	-0,0072	0,3353
6,25	0,4831	0,6146	-0,0099	-0,6370	-0,0073	0,3404
6,67	0,6403	0,5643	-0,0064	-0,6027	-0,0074	0,3301
10	1,0329	0,4138	0,0053	-0,6740	-0,0071	0,3286
12,5	0,9379	0,4323	0,0047	-0,7860	-0,0066	0,3039
14,29	0,9402	0,4329	0,0051	-0,8382	-0,0064	0,2987
16,67	1,0035	0,4148	0,0067	-0,8531	-0,0063	0,3000
20	1,0903	0,3812	0,0093	-0,8555	-0,0062	0,3025
33,33	0,4945	0,4995	0,0005	-0,8121	-0,0061	0,2905
50	0,4660	0,5014	0,0003	-0,8030	-0,0061	0,2898

Quadro 4.7 – Coeficientes da *EPMS* para a o perfil tipo 3

Frequência [Hz]	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	σ_ε
0,17	-7,5597	2,0425	-0,0810	-0,8425	-0,0021	0,2349
0,24	-7,7807	2,2222	-0,0989	-0,7765	-0,0024	0,2359
0,33	-8,1247	2,4545	-0,1240	-0,6786	-0,0030	0,2380
0,52	-7,7169	2,5141	-0,1382	-0,6017	-0,0038	0,2441
0,95	-6,5761	2,3834	-0,1373	-0,5851	-0,0048	0,2573
1,28	-5,6397	2,1649	-0,1233	-0,5552	-0,0054	0,2638
1,67	-4,7340	1,9224	-0,1066	-0,4957	-0,0060	0,2749
1,96	-4,1734	1,7616	-0,0953	-0,4422	-0,0065	0,2840
2,44	-3,3741	1,5102	-0,0773	-0,3304	-0,0071	0,3011
3,33	-2,0755	1,0802	-0,0487	-0,1003	-0,0076	0,3355
4,17	-1,0819	0,7583	-0,0286	0,0037	-0,0073	0,3234
5	-0,5444	0,5804	-0,0162	-0,0187	-0,0070	0,3117
5,88	-0,4234	0,5401	-0,0120	-0,0889	-0,0069	0,3104
6,25	-0,4206	0,5373	-0,0108	-0,1370	-0,0069	0,3031
6,67	-0,4665	0,5501	-0,0107	-0,1822	-0,0069	0,2931
10	-0,7207	0,6268	-0,0137	-0,3088	-0,0067	0,2757
12,5	-0,7655	0,6392	-0,0141	-0,3312	-0,0067	0,2768
14,29	-0,5414	0,5722	-0,0089	-0,3377	-0,0066	0,2812
16,67	-0,4246	0,5365	-0,0062	-0,3415	-0,0066	0,2822
20	-0,4275	0,5346	-0,0059	-0,3489	-0,0065	0,2813
33,33	-1,0377	0,6815	-0,0167	-0,3052	-0,0066	0,2743
50	-1,0865	0,6921	-0,0174	-0,3005	-0,0066	0,2738

Quadro 4.8 – Coeficientes da *EPMS* para o perfil tipo 4

Frequência [Hz]	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	σ_ε
0,17	-7,8903	2,1438	-0,0885	-0,8507	-0,0021	0,2344
0,24	-8,1094	2,3213	-0,1063	-0,7799	-0,0024	0,2354
0,33	-8,4406	2,5457	-0,1310	-0,6725	-0,0030	0,2374
0,52	-7,9856	2,5821	-0,1437	-0,5769	-0,0038	0,2426
0,95	-6,8271	2,4311	-0,1417	-0,5327	-0,0048	0,2533
1,28	-5,7667	2,1942	-0,1265	-0,5469	-0,0052	0,2587
1,67	-4,6782	1,9329	-0,1082	-0,5705	-0,0056	0,2662
1,96	-3,9913	1,7634	-0,0960	-0,5852	-0,0058	0,2708
2,44	-3,0627	1,5202	-0,0778	-0,5858	-0,0062	0,2766
3,33	-1,9215	1,2011	-0,0542	-0,5192	-0,0069	0,2874
4,17	-1,2311	0,9857	-0,0390	-0,4536	-0,0072	0,2889
5	-0,6968	0,8120	-0,0261	-0,4584	-0,0072	0,2888
5,88	-0,4114	0,7233	-0,0190	-0,5034	-0,0071	0,2908
6,25	-0,2657	0,6768	-0,0152	-0,5290	-0,0071	0,2932
6,67	-0,1535	0,6406	-0,0121	-0,5520	-0,0070	0,2956
10	0,6579	0,3612	0,0085	-0,5287	-0,0069	0,3008
12,5	0,2677	0,4519	0,0027	-0,5933	-0,0064	0,2924
14,29	-0,2190	0,5859	-0,0065	-0,6399	-0,0062	0,2839
16,67	-0,4241	0,6416	-0,0104	-0,6509	-0,0061	0,2818
20	-0,5966	0,6875	-0,0136	-0,6567	-0,0060	0,2807
33,33	-0,8538	0,7521	-0,0182	-0,6560	-0,0059	0,2789
50	-0,8774	0,7579	-0,0187	-0,6558	-0,0059	0,2787

Quadro 4.9 – Coeficientes da *EPMS* para o perfil tipo 5

Frequência [Hz]	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	σ_ε
0,17	-8,4556	2,2924	-0,0995	-0,8225	-0,0021	0,2339
0,24	-8,6666	2,4680	-0,1172	-0,7490	-0,0024	0,2348
0,33	-8,9512	2,6791	-0,1410	-0,6417	-0,0031	0,2368
0,52	-8,3692	2,6748	-0,1507	-0,5449	-0,0039	0,2419
0,95	-7,1627	2,4884	-0,1462	-0,4806	-0,0049	0,2518
1,28	-6,1311	2,2355	-0,1297	-0,4720	-0,0053	0,2557
1,67	-5,0621	1,9543	-0,1100	-0,4826	-0,0056	0,2617
1,96	-4,3756	1,7706	-0,0966	-0,5022	-0,0058	0,2651
2,44	-3,4191	1,5041	-0,0766	-0,5367	-0,0059	0,2683
3,33	-2,1493	1,1502	-0,0494	-0,6146	-0,0060	0,2735
4,17	-1,3844	0,9393	-0,0328	-0,6880	-0,0059	0,2766
5	-0,7975	0,7783	-0,0200	-0,7592	-0,0057	0,2784
5,88	-0,4567	0,6890	-0,0128	-0,8138	-0,0056	0,2792
6,25	-0,2702	0,6400	-0,0088	-0,8433	-0,0055	0,2803
6,67	-0,1274	0,6047	-0,0058	-0,8750	-0,0054	0,2812
10	0,5952	0,4370	0,0078	-1,0064	-0,0050	0,2915
12,5	0,7806	0,4067	0,0102	-1,0455	-0,0050	0,2970
14,29	0,8760	0,3894	0,0117	-1,0716	-0,0049	0,2973
16,67	0,8062	0,4025	0,0109	-1,0815	-0,0048	0,2966
20	0,4803	0,4705	0,0063	-1,0787	-0,0046	0,2945
33,33	-0,9288	0,7853	-0,0169	-0,9575	-0,0045	0,2768
50	-1,0620	0,8094	-0,0187	-0,9355	-0,0045	0,2754

Quadro 4.10 – Coeficientes da *EPMS* para o perfil tipo 6

Frequência [Hz]	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	σ_ε
0,17	-7,7957	2,1151	-0,0863	-0,8509	-0,0021	0,2342
0,24	-8,0160	2,2927	-0,1042	-0,7799	-0,0024	0,2353
0,33	-8,3507	2,5179	-0,1289	-0,6726	-0,0030	0,2372
0,52	-7,9123	2,5582	-0,1419	-0,5759	-0,0038	0,2425
0,95	-6,7785	2,4105	-0,1402	-0,5274	-0,0048	0,2529
1,28	-5,7419	2,1749	-0,1250	-0,5347	-0,0052	0,2578
1,67	-4,6649	1,9125	-0,1066	-0,5563	-0,0056	0,2650
1,96	-3,9768	1,7420	-0,0943	-0,5760	-0,0059	0,2697
2,44	-3,0387	1,4973	-0,0759	-0,5901	-0,0062	0,2757
3,33	-1,9021	1,1837	-0,0521	-0,5392	-0,0070	0,2911
4,17	-1,2540	0,9706	-0,0368	-0,3962	-0,0076	0,3103
5	-0,6204	0,7356	-0,0218	-0,2172	-0,0079	0,3079
5,88	-0,2308	0,5931	-0,0126	-0,1775	-0,0077	0,2969
6,25	-0,0843	0,5372	-0,0085	-0,1991	-0,0076	0,3004
6,67	-0,0333	0,5163	-0,0064	-0,2515	-0,0074	0,3010
10	-0,1986	0,5589	-0,0065	-0,4731	-0,0068	0,2828
12,5	-0,3890	0,6118	-0,0097	-0,5232	-0,0066	0,2805
14,29	-0,4530	0,6342	-0,0110	-0,5536	-0,0064	0,2801
16,67	-0,4555	0,6417	-0,0114	-0,5770	-0,0064	0,2801
20	-0,3866	0,6419	-0,0112	-0,6262	-0,0062	0,2810
33,33	-0,5469	0,6608	-0,0125	-0,5847	-0,0063	0,2804
50	-0,5403	0,6591	-0,0124	-0,5845	-0,0062	0,2800

4.4.3. Análise dos resultados obtidos

Fazendo uma análise aos coeficientes obtidos, constata-se que estes adquirem valores compatíveis com os fenómenos físicos que pretendem representar.

Assim o coeficiente C_2 assume valores positivos, traduzindo a relação directa da variação de amplitude do movimento do solo com a energia libertada (magnitude), ao passo que C_3 adquire, em geral, valores negativos. Tal facto deve-se a este parâmetro pretender traduzir a observação de que a amplitude do movimento sísmico não cresce indefinidamente com a magnitude, representando assim a saturação do espectro para valores de magnitude elevados.

Os coeficientes C_4 e C_5 assumem também valores negativos, uma vez que traduzem a variação da amplitude do movimento do solo, com a distância, representando ainda o declive das parcelas de atenuação geométrica e atenuação elástica, respectivamente.

Relativamente aos valores obtidos para o desvio, σ_ε , estes apresentam pequenas variações, entre cada conjunto de coeficientes e também entre frequências do mesmo conjunto. É ainda possível de observar que valores obtidos apresentam valores semelhantes aos quando comparados com os valores habitualmente obtidos para o efeito (p. ex. Boore e Atkinson, 2006 ou Carvalho, 2007).

Estando definidas as equações de previsão de movimentos, é pertinente avaliar qual a influência que cada tipo de solo exerce na forma do espectro de aceleração. Para o efeito foram calculados os espectros de aceleração, à superfície, para combinações de três valores de magnitude de momento M_w (4,1, 5,3 e 6,5) e de distâncias focais (10, 50 e 100 km), gerando-se um total de nove cenários compatíveis com a acção sísmica presente na norma Eurocódigo 8, para o arquipélago dos Açores (acção sísmica tipo 2 – evento sísmico com magnitude moderada com epicentro próximo).

O conjunto de espectros resultantes é apresentado nas Figura 4.3 a 4.6, estando presentes, em cada, os sete espectros de aceleração, à superfície, para cada uma das distâncias focais. Tal permite avaliar a evolução do comportamento espectral com a evolução da distância, tendo-se em conta a mesma magnitude de evento.

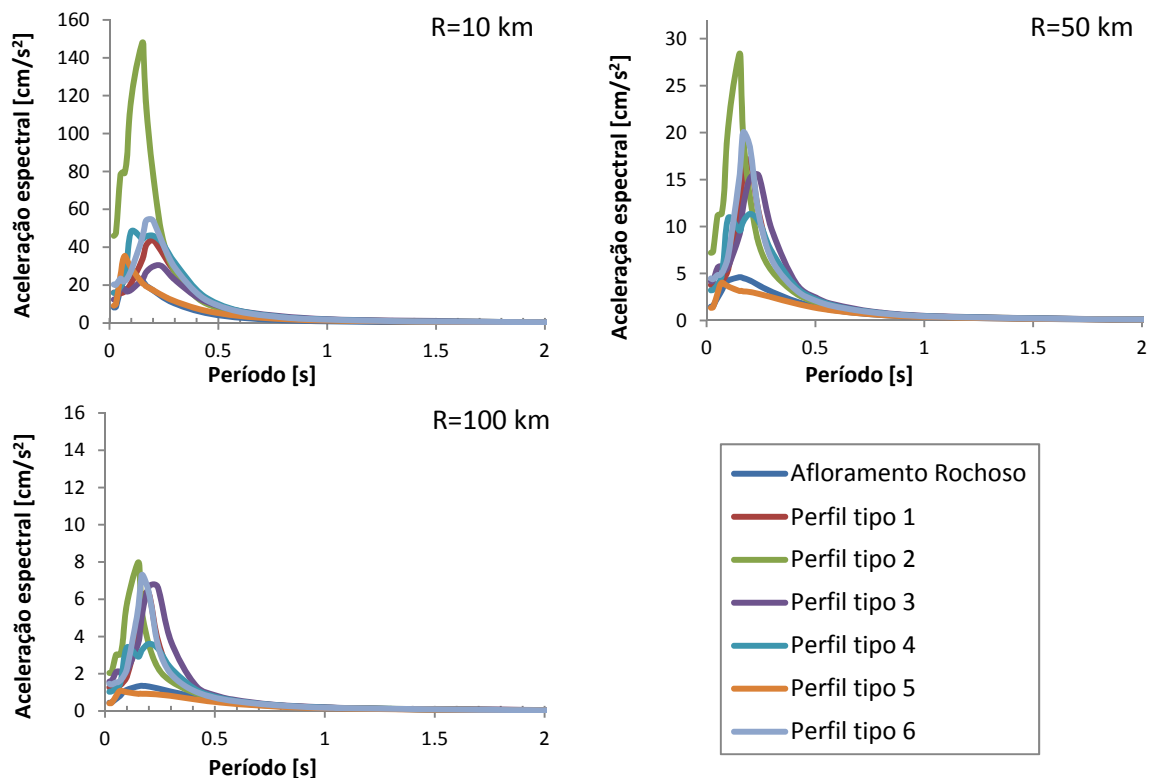


Figura 4.3 – Espectros de resposta em aceleração para afloramento rochoso e para os seis tipos de perfil, considerando um cenário de magnitude $M_w = 4,1$ para as distâncias de 10, 50 e 100 km.

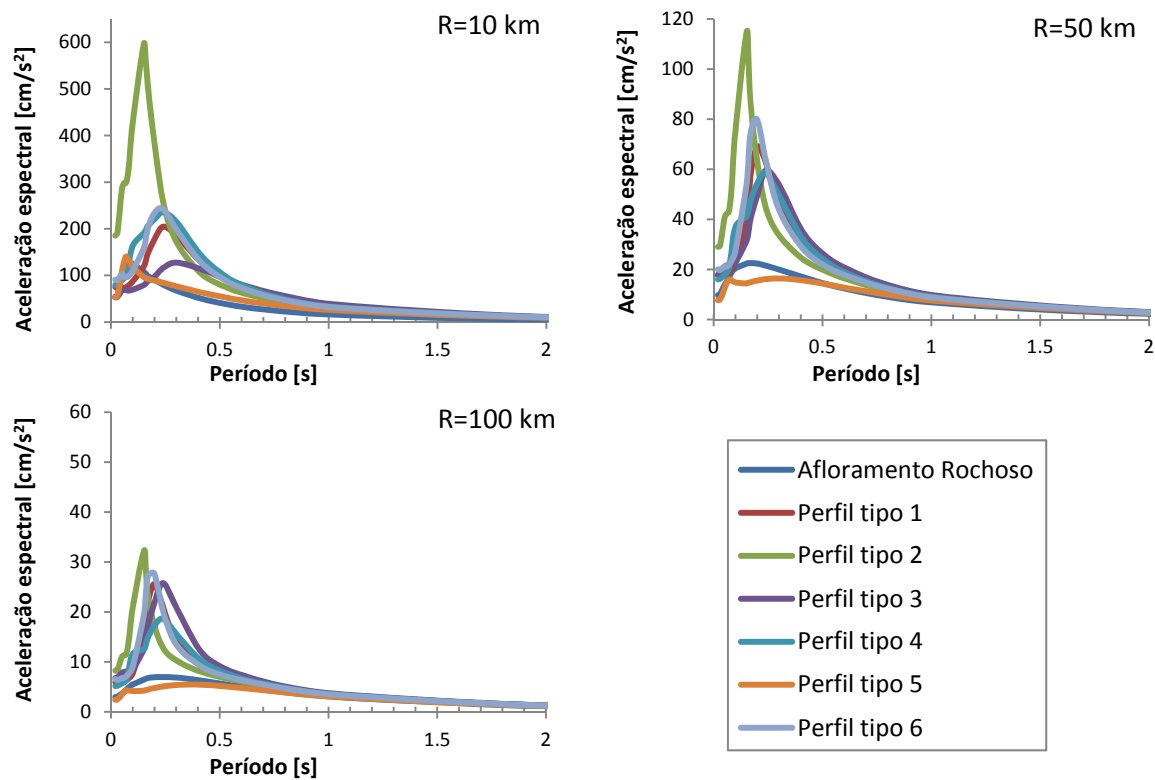


Figura 4.4 – Espectros de resposta em aceleração para afloramento rochoso e para os seis tipos de perfil, considerando um cenário de magnitude $M_w = 5,3$ para as distâncias de 10, 50 e 100 km.

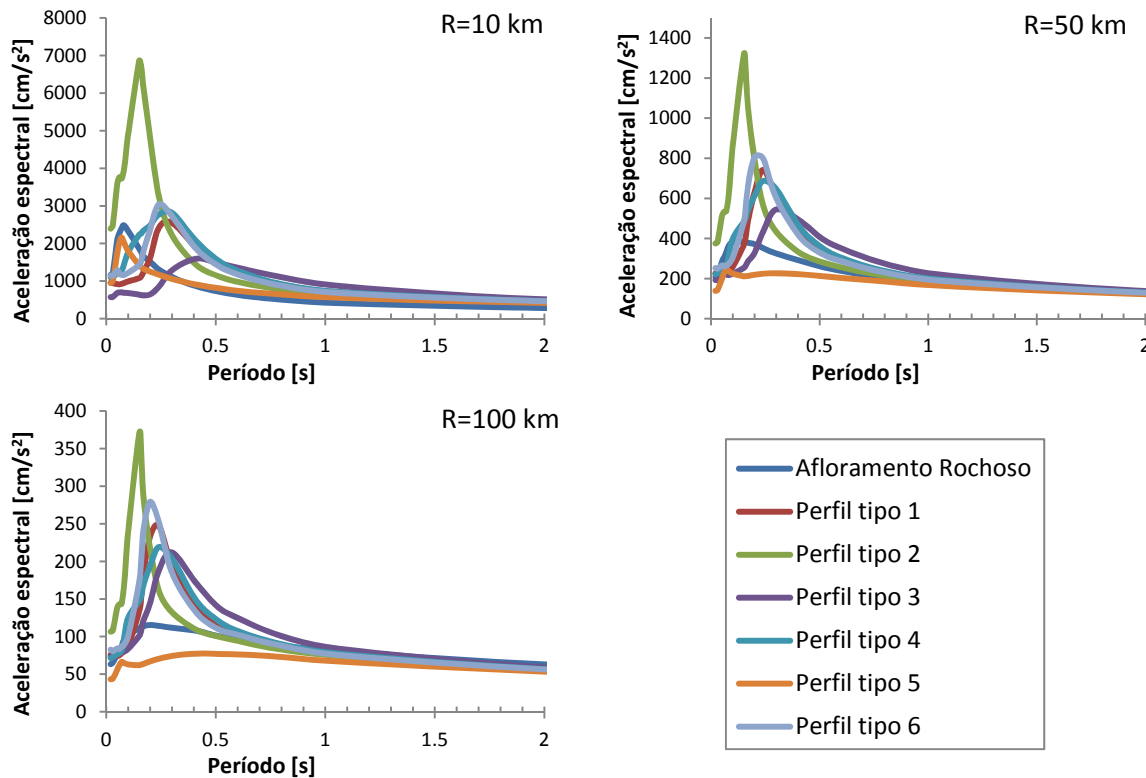


Figura 4.5 – Espectros de resposta em aceleração para afloramento rochoso e para os seis tipos de perfil, considerando um cenário de magnitude $M_w = 6,5$ para as distâncias de 10, 50 e 100 km.

Com base na análise efectuada, e considerando-se o espectro relativo ao afloramento rochoso como espectro de referência, é possível retirar-se as seguintes observações:

- para uma mesma magnitude, e em todas as distâncias, valor máximo do espectro relativo de cada um dos perfis ocorre, aproximadamente, para o mesmo período;
- em todos os cenários analisados, a amplitude do movimento decresce com o incremento da distância à fonte para todos os perfis de solo apresentados, e para o afloramento rochoso;
- o perfil tipo 5 é o único perfil que atenua o espectro de referência, verificando-se o mesmo comportamento em todos os cenários analisados;
- a forma do espectro de resposta encontra-se dependente do tipo de perfil considerado;
- para os perfis de tipo 1 e de tipo 6, em que ambos derivam do mesmo modelo proposto por Malheiro e Nunes (2007), as diferenças nos valores espectrais são mais notórias nas magnitudes M_w superiores a 5,3;
- a influência do tipo de perfil torna-se menos relevante para definição da amplificação espectral para períodos superiores, aproximadamente, a 0,5s, 0,8 s e 1 s, para magnitudes de 4,1, 5,3 e 7,5 respectivamente, verificando-se a redução destes limites com o incremento da distância.

De forma a ilustrar a influência do tipo de perfil na amplificação, em função da distância, são apresentados na Figura 4.6 os valores espectrais, para a magnitude de 5,3 M_w , para os períodos de 0,3s e 1s. Verifica-se que esta influência é maior para os baixos períodos e curtas distâncias.

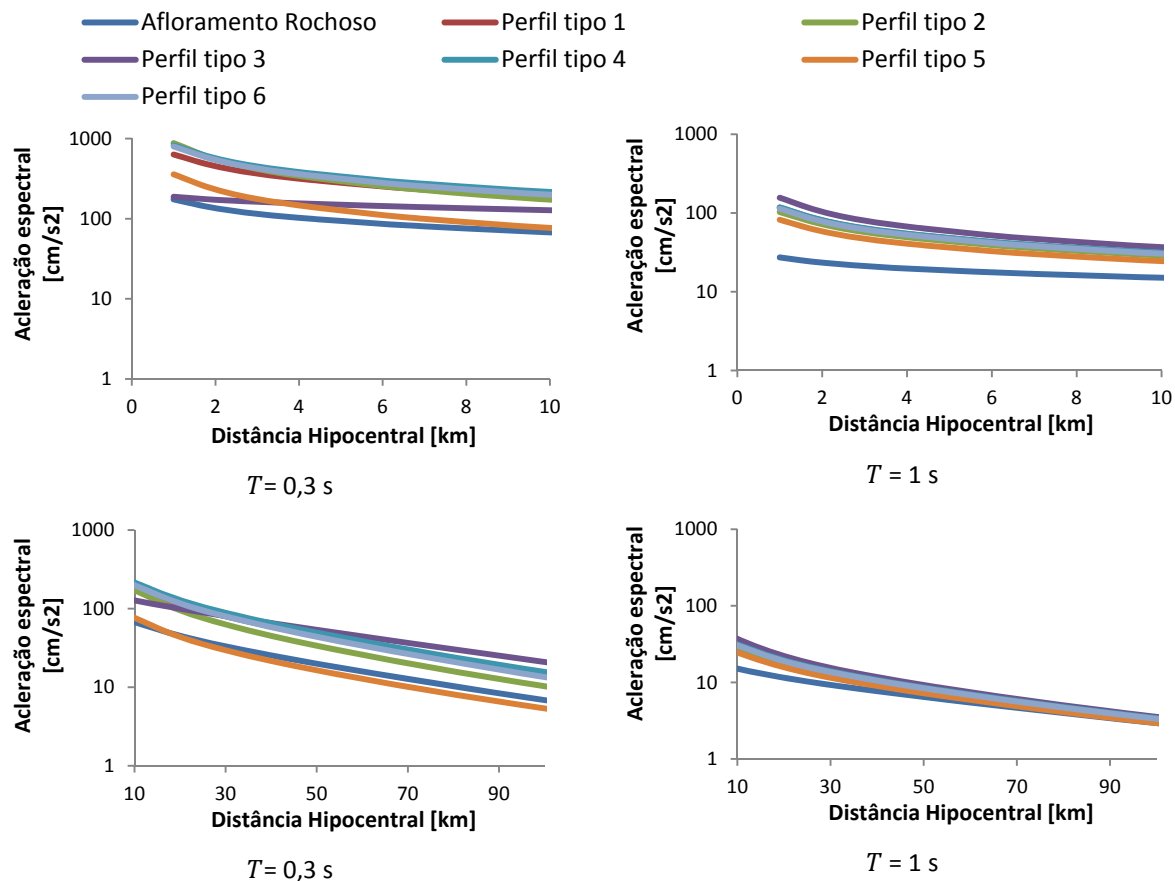


Figura 4.6 – Valores de aceleração espectral para magnitude $M_w = 5,3$ para os períodos de 0,3 s e 1 s.

4.5. Comparação com Equações Existentes que Considerem o Comportamento Não Linear dos Solos

Uma vez definidas as equações de previsão de movimentos sísmicos para os tipos de perfil, e afloramento rochoso, será interessante efectuar uma comparação com equações de previsão anteriormente publicadas, que considerem os efeitos do comportamento não linear do solo.

O número de estudos visando a proposta de equações que considerem os efeitos sísmicos de sítio é ainda reduzido, no entanto, Boore e Atkinson (2006) desenvolveram equações para a previsão dos movimentos sísmicos à superfície, considerando o comportamento não linear dos solos mais superficiais. Estas equações foram desenvolvidas para a América do Norte estando ainda incluídas as zonas tectonicamente activas (p. ex. Califórnia), o que permite que se utilizem as equações referidas para a previsão dos movimentos superficiais na região analisada no presente trabalho, também ela localizada numa zona tectonicamente activa.

As equações propostas por Boore e Atkinson (2006) apresentam-se com a forma da expressão (4.8) sendo o tipo de solo contemplado através do parâmetro S ,

$$\log(PGA) = C_1 + C_2 \cdot M + C_3 \cdot M^2 + (C_4 + C_5 \cdot M^2) \cdot f_1 + (C_6 + C_7 \cdot M) \cdot f_2 + (C_8 + C_9 \cdot M) \cdot f_0 + C_{10} \cdot R + S \quad (4.8)$$

em que $f_0 = \max(\log(\frac{10}{R}), 0)$; $f_1 = \log R$; $f_2 = \max(\log(\frac{R}{140}), 0)$ e S depende das características como valor representativo da velocidade das ondas de corte nos 30m de terreno imediatamente abaixo da superfície (V_{30}) do solo de acordo com a expressão (4.9 a) e (4.9 b).

$$S = \log \left\{ e^{\left[b_{lin} \cdot \ln\left(\frac{V_{30}}{V_{ref}}\right) + b_{nl} \cdot \ln\left(\frac{60}{100}\right) \right]} \right\} \quad \text{para } pgaB/C \leq 60 \text{ cm/s}^2 \quad (4.9 \text{ a})$$

$$S = \log \left\{ e^{\left[b_{lin} \cdot \ln\left(\frac{V_{30}}{V_{ref}}\right) + b_{nl} \cdot \ln\left(\frac{pgaB/C}{100}\right) \right]} \right\} \quad \text{para } pgaB/C > 60 \text{ cm/s}^2 \quad (4.9 \text{ b})$$

sendo $V_{ref}=760\text{m/s}$ e $pgaB/C$ o valor estimado de PGA (Peak Ground Acceleration), pela expressão (4.8), substituindo o valor de S , pelo valor nulo (V_{30} por V_{ref}). No âmbito destas equações B/C representa o valor velocidade de propagação, das ondas de corte, que separa as classes de solo B (firme rochoso) e C (solo firme ou rocha branda), de acordo com BSSC (2001), sendo este valor designado por V_{ref} .

Os coeficientes b_{lin} e b_{nl} fazem referência ao comportamento linear e não linear dos solos, encontrando-se definidos em Boore *et al.* (1997) e Choi e Stewart (2005) respectivamente.

A obtenção das ordenadas espectrais recorrendo à equação (4.8) permite a comparação com os resultados obtidos por aplicação das equações elaboradas no presente estudo, sendo necessário o cálculo do parâmetro S , para cada um dos solos contemplados, através das expressões (4.9 a) ou (4.9 b), dependendo do valor de $pgaB/C$.

De acordo com as expressões apresentadas, para o cálculo do parâmetro S , é necessário o valor médio V_{30} de cada um dos seis tipos de perfil aqui contemplados (excluindo-se neste âmbito o afloramento rochoso). Uma vez que os perfis estratigráficos sintéticos apresentam profundidades inferiores a 30 m, o valor de V_{30} é calculado através da expressão (4.10), proposta por Boore (2004) para modelos em que a profundidade atingida seja inferior ao valor já mencionado,

$$\log V_{30} = a + b \log \left(\frac{d}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \right) \quad (4.10)$$

na qual a e b são parâmetros que dependem da profundidade do perfil (Boore, 2004), d , n é o número de estratos da sequencia estratigráfica, h_i a espessura do estrato i e v_i a velocidade média das ondas de corte no estrato i .

A expressão (4.10) permite definir o valor de V_{30} para os conjunto de perfis tipo, apresentando-se o resumo dos valores no Quadro 4.11. Por sua vez, estes possibilitam a obtenção do parâmetro S através da aplicação das expressões (4.9 a) ou (4.9 b).

Quadro 4.11 – Valores de V_{30} para os conjuntos de perfis de solo

	Perfil Tipo 1	Perfil Tipo 2	Perfil Tipo 3	Perfil Tipo 4	Perfil Tipo 5	Perfil Tipo 6
V_{30} [m/s]	722	560	340	371	365	640

Para a comparação entre os valores espectrais, obtidos pela aplicação das diferentes *EPMS*, são calculados os espectros de resposta de aceleração, relativos aos diferentes tipos de perfil, para os nove cenários já mencionados na secção 4.4.3.

A Figura 4.7 apresenta os espectros de resposta de aceleração obtidos para cada um dos tipos de solo e relativos ao cenário $5,3 M_w/50\text{km}$. Este espectro é constituído pelo valor estimado (i.e. valor médio) da ordenada espectral previsto pelas equações *EPMS* aqui deduzidas. As restantes comparações, relativas aos outros cenários, são apresentadas em anexo. Nesta figura, inclui-se uma banda de dispersão definida pela soma e subtração daquele valor médio com o valor estimado do desvio padrão para o período respectivo.

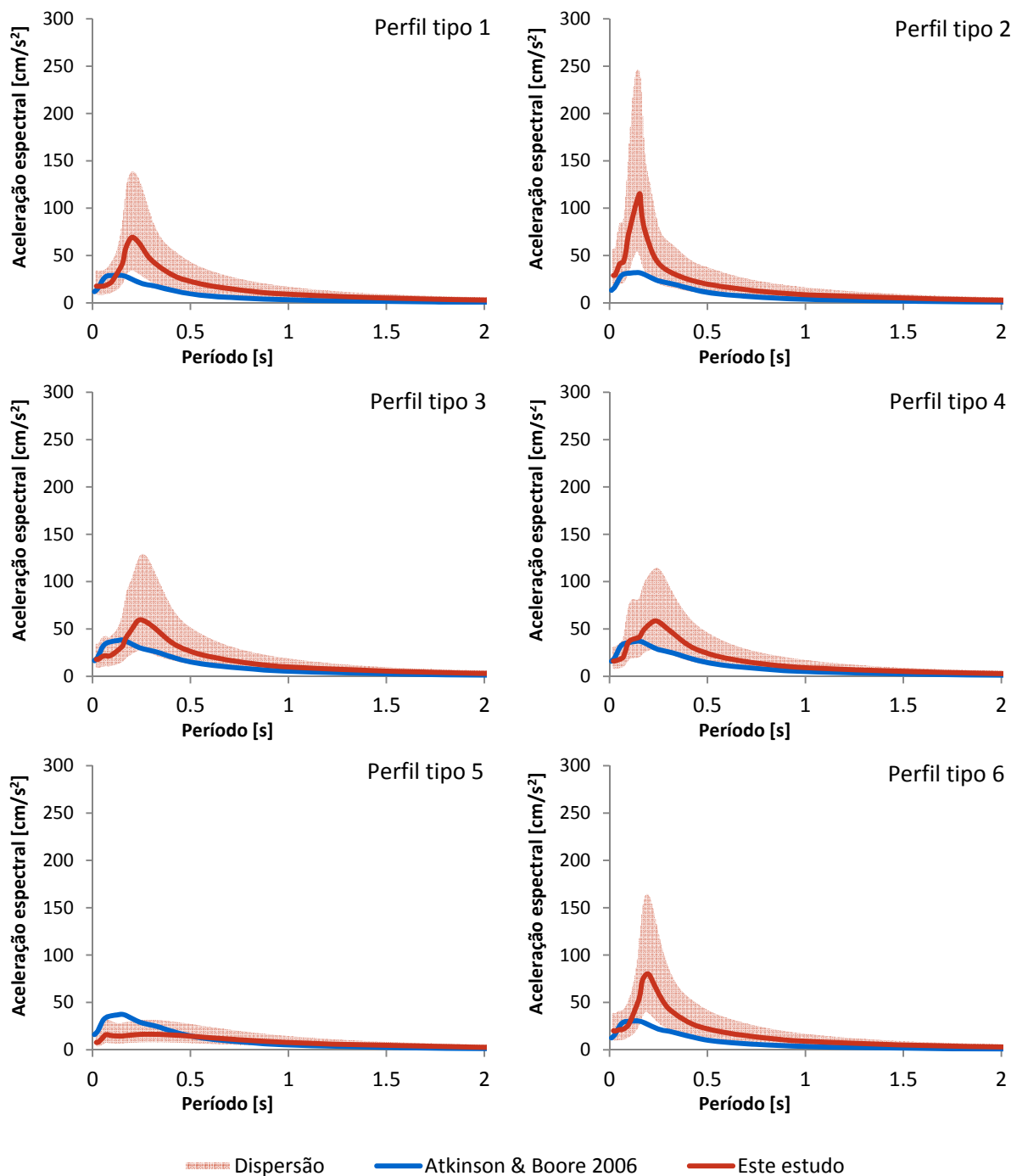


Figura 4.7 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 5,3$, $R = 50$ km.

Como resultado da comparação efectuada aos espectros médios de aceleração, é possível formular-se as seguintes conclusões:

- para curtas distâncias as equações propostas por Boore e Atkinson (2006) apresentam valores mais elevados que as equações deduzidas para os Açores, sobrestimando os valores de aceleração espectral;
- para distâncias maiores as mesmas equações, parecem subestimar os valores de aceleração, principalmente para as magnitudes reduzidas, excepto para o perfil de tipo 5, para o qual os valores são largamente sobrestimados;
- em magnitudes e distâncias igualmente elevadas, os valores médios de amplitude estimados por ambas as equações são comparáveis, permitindo combinação destas em “árvores lógicas” e a consequente redução da incerteza epistémica nos estudos de perigosidade sísmica;
- as equações elaboradas no decorrer do presente estudo estimam os valores de pico, para períodos consideravelmente mais elevados, quando comparados com os respectivos estimados pelas equações de Boore e Atkinson (2006), aproximando-se melhor dos períodos predominantes relativos aos terrenos da região (Teves-Costa *et al.*, 2004, Teves-Costa e Veludo, 2013, Maia, 2011).

4.6. Aplicação dos Resultados Obtidos a um Registo Real

A avaliação da qualidade dos valores de amplitude de movimentos, estimados pelas equações agora obtidas, deve ser efectuada considerando-se um registo sísmico conhecido, para um local do arquipélago.

Embora a região dos Açores esteja localizada numa zona de dinâmica de estruturas tectónicas, o que lhe confere uma actividade sísmica intensa, os registos existentes, respeitantes a magnitudes moderadas a elevadas, são escassos.

No decurso da implementação da rede nacional de acelerómetros foram instaladas estações de registo em diversos pontos das ilhas do arquipélago que permitem o registo dos movimentos do terreno devido a eventos sísmicos, na região.

De modo a efectuar uma análise qualitativa dos resultados, agora obtidos, é necessário que se disponha de um registo real na forma de acelerograma relativo a um evento sísmico do qual sejam conhecidas a magnitude e a distância hipocentral, sendo também relevante a informação acerca do terreno que constitui o local em que foi obtido o registo.

4.6.1. Evento sísmico considerado

Para o efeito foi considerado o registo sísmico referente ao evento ocorrido a 9 de Julho de 1998, com magnitude $M_w = 6,1$, de acordo com Fernandes *et al.* (2002) e Estevão e Carvalho (2014), e epicentro localizado nas coordenadas 38° 63" N; 28° 522 W e a uma profundidade de 5 km, de acordo com IPMA (2014).

O registo sísmico, do evento considerado, é relativo à estação com a designação GZC, estando o equipamento localizado ao nível do solo, nas coordenadas 38° 6557" N; 27° 2167" W (Vilanova *et al.*, 2009). Esta estação encontra-se, ainda, localizada no interior de uma habitação típica, na qual se encontra instalado o Gabinete da Zona Classificada, estando localizada na zona urbana classificada, Zona Histórica (C.N.C, 1991) em Angra do Heroísmo (ilha Terceira).

O registo considerado é um registo não filtrado, contendo por isso a contribuição de ondas de superfície, e refere-se a uma distância hipocentral de 113 km (IPMA, 2014).

4.6.2. Tipo de solo do local

Para a estação em questão, as informações referentes ao solo existente no local são apenas de um terreno firme ou rijo que se sobrepõe a um estrato com menor rigidez (Vilanova *et al.*, 2009). Tal informação é escassa para efectuar uma identificação de acordo com os perfis estratigráficos sintéticos elaborados neste estudo.

A representação do terreno através dos perfis de solo sintéticos elaborados no capítulo 3 tem como base os perfis das propriedades médias em profundidade e o módulo de corte dos materiais, obtido pela expressão (2.52), para os primeiros estratos dos diferentes perfis. O Quadro 4.12 apresenta os valores do módulo de corte, G , para os primeiros quatro estratos de cada um dos perfis estratigráficos.

Quadro 4.12 – Valores de G médio para os primeiros quatro estratos dos perfis de solo

G [kPa]	Perfil Tipo 1	Perfil Tipo 2	Perfil Tipo 3	Perfil Tipo 4	Perfil Tipo 5	Perfil Tipo 6
G estrato 1	2444	318	171	934	171	615
G estrato 2	77	67	916	32	66	76
G estrato 3	893	133	134	934	171	927
G estrato 4	12874	186	916	131	66	12712

De acordo com as informações disponíveis acerca do terreno, foram considerados os perfis estratigráficos, identificados para Angra do Heroísmo, permitindo a identificação dos coeficientes a utilizar e o consequente cálculo do espectro de resposta de aceleração à superfície do terreno.

Malheiro e Nunes (2007) identificam, para Angra do Heroísmo, dois tipos de perfis estratigráficos que correspondem aos perfis de tipo 1 e 2. Tendo em conta o presente estudo, para a simulação é ainda necessário considerar-se também o perfil de tipo 6, por este representar também um perfil identificado para o local.

4.6.3. Comparação espectral entre o registo e as estimativas obtidas pelas equações do presente estudo

Para a comparação entre os registos reais e os valores estimados são apresentados os espectros de aceleração relativos ao registo horizontal para o intervalo de períodos [0 s; 4 s] nas direcções X (E-W) e Y (N-S), o espectro de aceleração obtido pela aplicação das equações e respectiva dispersão de resultados associada, para os perfis de tipo 1, 2 e 6, Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 respectivamente.

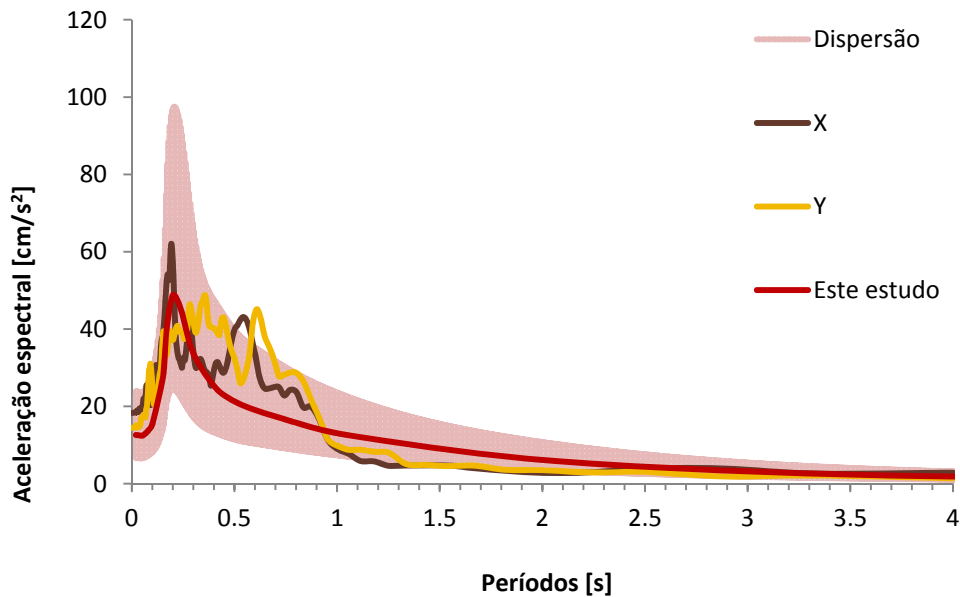


Figura 4.8 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento $M_w = 6,1$, $R = 113$ km e perfil do tipo 1).

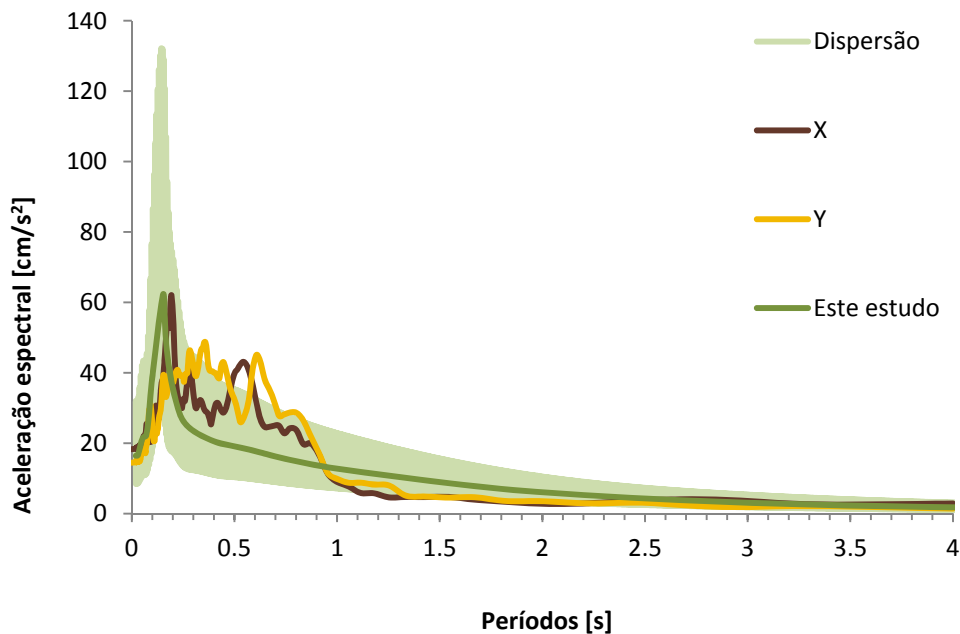


Figura 4.9 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento $M_w = 6,1$, $R = 113$ km e perfil do tipo 2).

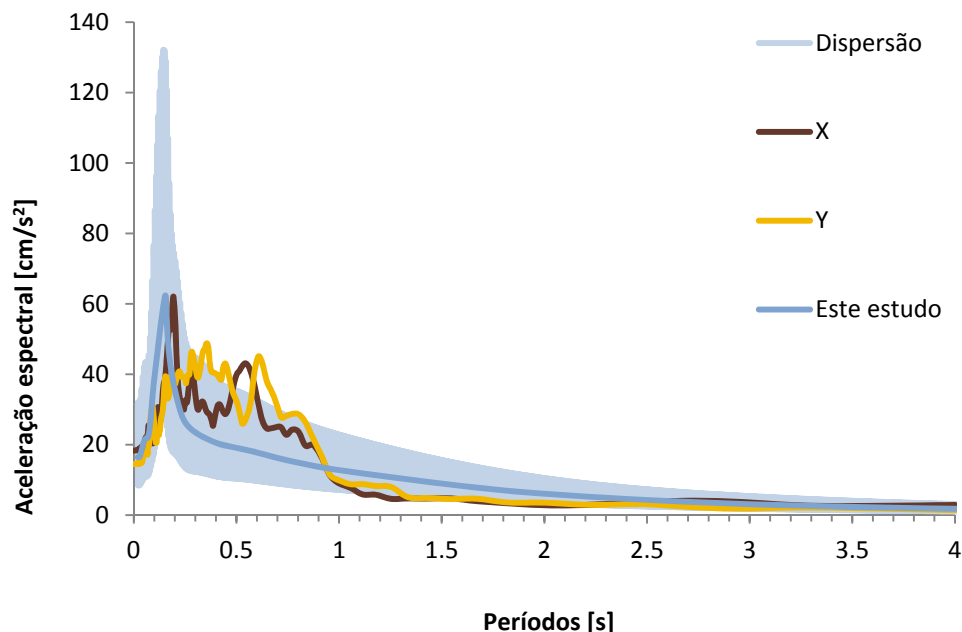


Figura 4.10 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento $M_w = 6,1$, $R = 113$ km e perfil do tipo 6).

Da observação directa dos três espectros apresentados é possível concluir-se que:

- embora as equações de previsão não consigam estimar todo o espectro, são obtidos resultados aceitáveis, dentro da incerteza do modelo;
- para os perfis de tipo 1 e de tipo 6, embora os valores máximos estimados sejam inferiores aos presentes no registo da direcção X (no entanto dentro da incerteza do modelo), destaca-se a ocorrência dos valores máximos no mesmo período;
- o perfil de tipo 2 estima o valor máximo com a mesma amplitude do valor máximo do registo em X, embora para um período inferior ao do registo.

A não conformidade do formato do espectro estimado, com o obtido a partir do registo, é justificada com o facto de:

- não existir um perfil estratigráfico para o local exacto, no qual se encontra instalada a estação sísmica, razão pela qual existe a possibilidade dos perfis apresentados não representarem, com exactidão, o terreno do local;
- o modelo utilizado, para a simulação de eventos sísmicos à superfície do terreno, apenas contemplar a propagação unidireccional das ondas de corte (S) através de uma coluna de solo, não estando incluídos os efeitos de ondas superficiais resultantes de combinações de efeitos de ondas, S e P .

4.7. Comentários Finais

A utilização do modelo linear equivalente permite a simulação dos movimentos sísmicos à superfície do terreno, que se encontra representado por um conjunto de perfis estratigráficos sintéticos representativos da variabilidade dos solos existentes numa região. Deste modo elaborou-se uma base de dados, contendo registos sísmicos sintéticos, para a superfície dos terrenos do Arquipélago dos Açores, preenchendo assim as lacunas existentes.

A base de dados de registos simulados, recém elaborada, permite a obtenção dos coeficientes que definem as equações de previsão dos movimentos à superfície, para cada tipo de terreno, tendo como variáveis explicativas a magnitude do evento e a distância hipocentral.

A forma do espectro de resposta de aceleração à superfície encontra-se dependente do tipo de solo para o qual é calculado o espectro, sendo que amplificação de cada um dos tipos de perfil é mais notória para períodos inferiores a 0,7s.

As equações do presente estudo permitem diferenciar, com um maior detalhe, as variações no comportamento para os vários tipos de solo, quando comparadas com equações de previsão dos movimentos superficiais para zonas tectonicamente activas (Boore e Atkinson, 2006). Resultam por isso espectros de aceleração, elástica, à superfície mais ajustados à realidade dos solos existentes na região dos Açores.

A simulação dos espectros de aceleração, à superfície, para o sismo de 9 de Julho de 1998 é efectuada recorrendo-se às equações, agora definidas, permitindo estimar os valores de forma bastante satisfatória, quando comparados com o registo obtido numa estação localizada na ilha Terceira, mesmo se consideradas as limitações do modelo utilizado (considera apenas a propagação vertical de ondas de corte, desprezando eventuais ondas de superfície) e da incerteza associada ao tipo de solo do local.

Conclui-se por isso que as equações obtidas, as primeiras do género para o arquipélago dos Açores, permitem estimar, com valores de erros aceitáveis, os valores espectrais de aceleração à superfície para os vários solos contemplados no Anexo Nacional do Eurocódigo8, relativos ao Arquipélago dos Açores. Os valores são estimados para eventos sísmicos susceptíveis de ocorrer na região, estando definidos por uma magnitude, M_w , e uma distância hipocentral R .

As equações de previsão, ou leis de atenuação, aqui propostas deverão ser utilizadas em conjunto com outras leis existentes, tais como as propostas por Boore e Atkinson (2006), na elaboração de estudos de perigosidade sísmica da região, contribuindo assim para diminuição da maior incerteza sistémica na avaliação da perigosidade e risco sísmico da região.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1. Principais Conclusões

O recurso às chamadas leis de atenuação espectral, ou equações de previsão de movimentos do solo, para estimar a amplitude dos movimentos sísmicos é de extrema importância para a elaboração de estudos de perigosidade sísmica e mitigação do risco sísmico, em regiões de elevada sismicidade.

Os processos estocásticos constituem uma ferramenta essencial para a modelação do evento sísmico, e obtenção do respectivo espectro de potência na fonte, permitindo a simulação de registos sintéticos, de eventos sísmicos com vista à obtenção de equações de previsão de movimentos para locais onde os registos disponíveis não sejam em número suficiente para tal.

A maior incerteza permanece no modo como a energia sísmica é transmitida através dos solos mais superficiais, sendo que a resposta do solo a acções cíclicas é avaliada com base na propagação de ondas através dos materiais, considerando o solo como um meio contínuo. Para efeitos de modelação, o solo é geralmente considerado como um sólido de Kelvin-Voigt, em que a sua resistência ao corte é constituída pela soma de duas parcelas, uma elástica e uma viscosa.

A simulação do comportamento não linear é realizada com a adopção de um modelo pseudo-linear, que faz depender as propriedades (módulo secante de corte e fracção de amortecimento) em função da deformação sofrida em cada camada pela aplicação da acção.

Os modelos de perfis estratigráficos elaborados e a metodologia utilizada permitem, de uma forma expedita, a geração de conjuntos de perfis sintéticos aos quais foi aplicado o método linear equivalente, para a avaliação da resposta dos mesmos face a eventos sísmicos.

Como aplicação prática tem-se a elaboração de uma base de dados sintética, contendo informações geotécnicas dos terrenos mais superficiais da região dos Açores que são representados por um conjunto de 1200 perfis, que se subdividem em seis tipos de perfil, e permitem a simulação de eventos sísmicos à superfície dos terrenos.

Ao conjunto de perfis elaborado correspondem perfis das propriedades médias em função da profundidade e que possibilitam a comparação dos resultados decorrentes de uma sondagem, mediante a adopção de um erro entre valores. Esta comparação permite estabelecer qual a (s) lei (s) de atenuação espectral que mais se adequam ao local.

A utilização da base de dados de espectros de aceleração em substrato rochoso para a região dos Açores, elaborada no âmbito do projecto SIGMA, possibilitou a obtenção dos coeficientes que definem as equações de previsão dos movimentos para o afloramento rochoso.

A mesma base de dados, utilizada agora como acção de *input*, e o recurso ao conjunto de perfis estratigráficos sintéticos, elaborados no presente estudo, viabilizou a simulação de movimentos sísmicos à superfície, contemplando-se a existência dos solos localizados a menor profundidade.

O conjunto de espectros de aceleração à superfície, resultante das simulações, permite a obtenção dos coeficientes para a definição das equações de previsão dos movimentos superficiais para os seis tipos de terreno, apresentados nos modelos do presente estudo.

As equações obtidas diferenciam com maior detalhe o comportamento dos vários tipos de solo, quando comparadas com equações de previsão dos movimentos superficiais para zonas tectonicamente activas (Boore e Atkinson, 2006), resultando por isso espectros de aceleração elástica, à superfície, mais ajustados à realidade dos solos existentes na região.

A forma do espectro de resposta de aceleração encontra-se dependente do tipo de solo, sendo que esta influência é perceptível pela amplificação que cada um dos perfis aplica ao espectro de afloramento rochoso. Esta diferenciação no valor da amplificação é mais notória para períodos inferiores a 0,7 s.

Considerando as limitações do modelo utilizado para as simulações (apenas considerar a propagação vertical de ondas de corte, desprezando eventuais ondas de superfície) e as incertezas associadas quer à definição do evento sísmico quer ao tipo de solo do local, a comparação dos espectros estimados pelas equações propostas com o registo real do sismo de 9 de Julho de 1998, permite concluir que as equações estimam de forma bastante satisfatória o valor de amplitude dos movimentos do registo.

Conclui-se então que as equações aqui obtidas, as primeiras para o arquipélago dos Açores, permitem estimar os valores espectrais de aceleração à superfície dos vários solos do Arquipélago dos Açores, para eventos sísmicos que ocorram na região. Como tal deverão ser utilizadas para a constituição de “árvores lógicas” nos estudos de perigosidade sísmica da região, contribuindo assim para uma diminuição da maior incerteza sistémica na avaliação da perigosidade e risco sísmico da região.

O trabalho realizado cumpriu o principal objectivo de desenvolver leis de atenuação espectral para a região dos Açores, considerando a influência dos terrenos mais superficiais na transmissão da energia sísmica através destes.

De referir que os resultados obtidos serão ainda inseridos no simulador de cenários sísmicos, LNECloss na forma de leis de atenuação espectral, considerando o substrato rochoso ou o solo existente para a região dos Açores

5.2. Desenvolvimentos Futuros

No domínio da simulação de eventos sísmicos à superfície

A dispersão de ondas tem grande influência na determinação dos movimentos sísmicos intensos para os terrenos mais superficiais. É por isso recomendável que para futuras avaliações da resposta sísmica dos terrenos mais superficiais, se procure contemplar não só a contribuição das ondas de corte mas também a contribuição de ondas de superfície, na definição do movimento superficial.

No domínio da caracterização do solo

Dada a incerteza associada à estrutura dos terrenos mais superficiais, da região dos Açores, e a sua influência, relativamente à caracterização dos movimentos superficiais, em eventos sísmicos considera-se fundamental a realização de uma nova campanha de prospecção, faseada:

- numa primeira fase, as prospecções devem incidir nos locais das estações sísmicas, de modo a caracterizar o solo nesse local e assim permitir o estabelecimento de relações entre o registo sísmico à superfície e o solo existente;
- numa segunda fase a campanha deve ser alargada ao conjunto das nove ilhas que constituem o arquipélago, realizando-se em vários locais das mesmas de modo a complementar as base de dados existente e referente aos solos da região.

Será também de extrema importância a realização de ensaios laboratoriais para determinação das propriedades dos materiais que constituem os solos da região, alargando-se assim a dimensão da amostra e dando uma maior relevância estatística à base de dados

No domínio da caracterização espectral

Após o término da fase de caracterização do solo será pertinente efectuar a comparação com os solos existentes no anexo nacional do Eurocódigo8 e proceder a uma reavaliação das equações de previsão do presente estudo, avaliando a ajustabilidade dos espectros obtidos com a nova informação geotécnica, com os que deriva da aplicação com os espectros que derivam do presente estudo.

6. Bibliografia

A

- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J.L., Marques, F., Queiroz, G., Ramos, T.B., Gonçalves, M.C. – *“Caracterização hidrológica e geotécnica de solos vulcânicos pomíticos com vista à integração em modelos determinísticos para a avaliação da estabilidade de vertentes no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores).”*, Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Volume VI, APGEOM, Braga, 2009, pp. 127-132.
- Arnalds, O., Buurman, F.B.P., Oskarsson, H., Stoops, G. - *“Soils Of Volcanic Regions Of Europe”*, Springer, 2007, 670 pp.
- Atkinson, G., Boore, D. – *“Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America”*, Bulletin of Seismic Society of America, Vol. 96, No. 6, 2006, pp. 2181 – 2205.
- Atkinson, G., Silva, W. – *“Stochastic modeling of California ground motions”*, Bulletin of Seismic Society of America, Vol. 90, No. 2, 2000, pp. 255 – 274.
- Azevedo, J.J.R. - *“Vibrações Aleatórias Dinâmica Estocástica.”*, Apontamentos da Disciplina de Dinâmica e Engenharia Sísmica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1996.

B

- Bezzeghoud, M., Borges, J.F., Caldeira, B., Buforn, E., Udias, A. – *“Seismic activity in the Azores Region in the context of the western part of the Eurasia-Nubia plate boundary.”*, International seminar on seismic risk and rehabilitation on the 10th anniversary of the July 9 1998 Azores Earthquake, Horta, 2008, pp. 27 – 31.
- Boore, D. - *“Simulation of ground motion using the stochastic method”*, Pure and Applied Geophysics, Vol. 160, 2003, pp. 635 – 676.
- Boore, D. - *“Estimating $\bar{V}_s(30)$ (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depths ≤ 30 m)”*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 2, 2004, pp. 591–597.
- Boore, D., Atkinson, G. – *“Boore-Atkinson NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV and SA at Spectral Periods of 0.1, 0.2, 1, 2, and 3 Seconds.”*, Interim Report for U.S.G.S, 2006.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. – *“Site amplifications for generic rock sites”*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 87, No. 2, 1997 pp. 327-341.
- Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.E. – *“Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work”*, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 128 – 154.
- Building Seismic Safety Council - *“NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (FEMA-368)”*, Federal Emergency Management Agency, 2000 Edition, 2001, 392 pp.

C

- Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A. e Carvalho, E.C. – “*Simulador de cenários sísmicos integrado num sistema de informação geográfica*”, 6º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Guimarães, 2004, pp. 455- 464.
- Carvalho, A. – “*Modelação Estocástica da Acção Sísmica em Portugal Continental*”, Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- Carvalho, A., Campos Costa, A., Oliveira, C.S. - “*A Finite-Fault Modeling of the 1755 Lisbon earthquake sources*”, Em: The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, Springer, Vol. 7, 2009, pp. 433-454.
- Carvalho, A., Reis, C. – “*Processos Físicos Para Simulação de Movimentos Sísmicos Intensos para o Arquipélago dos Açores*”, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2014.
- Carvalho, A., Zonno, G., Franceschina, G., Bilé Serra, J., Campos Costa, A. - “*Earthquake Shaking Scenarios for the Metropolitan Area of Lisbon.*”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No. 28, 2008, pp. 347–364.
- Cas, R.A.F., Wright, J.V. - “*Volcanic successions. Modern and ancient*”, Allen & Unwin, Ltd (Ed.), 1987, 528 pp.
- Choi, Y., Stewart, J.P. - “*Nonlinear site amplification as a function of 30m shear wave velocity*”, Earthquake Spectra, Vol. 21, No. 1, 2005, pp. 1-30.
- C.N.C., Gov. Açores, Gab. Zona Classificada, – “*Angra do Heroísmo: janela do Atlântico entre a Europa e o Novo Mundo*”, Lisboa, 1991.
- Cunha, A. - “*Dinâmica Estrutural Estocástica - Aplicações À Engenharia Sísmica.*”, Tese de doutoramento, Universidade do Porto, 1990.

D

- Di Traglia, F., Pistolesi, M., Rosi, M., Bonadonna, C., Fusillo, R., Roverato, M. - “*Geomorphology Growth and Erosion : The Volcanic Geology and Morphological Evolution of La Fossa (Island of Vulcano, Southern Italy) in the Last 1000 Years.*”, Geomorphology, Volume 194, 2013, pp. 94–107

E

- Estêvão, J.M.C, Carvalho, A. – “*Incertezas na simulação estocástica de sismos: o caso dos Açores*”, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2014.

F

- Fenton, G.A. - "Random Field Modeling of CPT Data.", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 6, 1999, pp. 486–498.
- Fenton, G.A. - "*Estimation for Stochastic Soil Models.*", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 6, 1999, pp. 470-485.
- Fernandes, R.M.S., Miranda, J.M., Catalão, J., Luis, J.F., Bastos, L., Ambrosius, B.A.C. – "*Coseismic displacements of the MW = 6.1, July 9, 1998, Faial earthquake (Azores, North Atlantic)*", *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 16, 2002, pp. 21-24.
- Ferreira, A.B. – "*Geodinâmica e perigosidade natural das ilhas dos Açores*", *Finisterra* 79, 2005, pp. 103-120.
- Forjaz, V.H. – "*Azores study tour. Field trip guide: Seminar on prediction Earthquakes*", European Commission for Europe, United Nations, Lisboa, 1988, 26 pp.
- França, Z, J.V. Cruz, V.H. Forjaz, P. Borges - "*Geologia dos Açores: Uma Perspectiva Actual.*", *Revista Açoreana*, Sociedade Afonso de Chaves, Vol. 10, No. 1, 2003, pp. 11 - 140.
- Fragoso, M. – "*Proposta de caracterização Geológica e Geotécnica dos Perfis Estratigráficos dos Açores.*", Relatório, LREC, Ponta Delgada, 2006.
- Fumal, T.E., Tinsley, J.C. – "*Mapping shear-wave velocities of near-surface geologic materials*", Em: *Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region-an earth-science perspective*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, 1985, pp. 127 – 150.

I

- Idriss, I, Sun, J. – "*Shake 91. A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*", University of California, 1992, 12 pp.
- IPMA: Instituto Português do Mar e Atmosfera, <https://www.ipma.pt/pt/geofisica/sismologia/>, Lisboa, 2014.
- Ishibashi, I, Zang, X. – "*Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay*", *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1, 1993, pp. 182 – 191.

K

- Kramer, S.L. – "*Geotechnical Earthquake Engineering*", Prentice Hall, 1996, 653pp.

L

- Lima, E., Nunes, J.C., Medeiros, S., Ponte, D. - "*Geodiversidade E Geossítios Da Ilha de São Jorge.*", Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 2012, 25 pp.
- Liu, J., Xiaoyu, C., Wenfeng, G. – "*Volcanic Natural Resources and Volcanic Landscape Protection: An Overview*" Em: "*Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems*", Karoly Nemeth (Ed.), 2012. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/updates-in-volcanology-new-advances-in-understanding-volcanic-systems/volcanic-natural-resources-and-volcanic-landscape-protection-an-overview>.

M

- Maia, L. – “*Cenários sísmicos em Ponta Delgada*”, Tese doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2011.
- Malfeito, N., Serra, J.P.B., Carvalho, A. – “*Geração de perfis estratigráficos artificiais para o Arquipélago dos Açores*”, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2014.
- Malheiro, A.M., Nunes, J.C. – “*Volcano stratigraphic profiles for the Azores region: a contribution for the EC8 Regulations and the characterization of volcanic rocks geo mechanical behavior*”, Em: Proceedings of international workshop on volcanic rocks, 11th congress ISRM, Ponta Delgada, Taylor& Francis, London, 2007, pp 59–64.
- Morais, I., Vales, D., Matias, L., Dias, N.A., Carrilho, F., Gaspar, J.L., Senos, L. – “*Revisão da sequência sísmica do Faial de 9-7-1998.*”, 4^a Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Figueira da Foz, 2004.
- Motta, J., Nunes, J.C. – “*Estudos gravimétricos na ilha de S Jorge (Açores) primeiros resultados.*”, Em: Proceedings of 3rd Luso-Spain Assembly of Geodesy, Valência, Spain, 2003, Tomo I, pp. 266–268.

N

- NP EN 1998-1 – “*Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras param edificios*”, Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2010.
- Nunes, J.C., Forjaz, V.H., Oliveira, C.S. - “*Geological mapping of Terceira Island (Azores) urban centres as a way to better understand the seismic response of buildings.*” Em: Proceedings of 2nd symposium of the Portuguese association for meteorology and geophysics. Évora, Portugal, 2001, pp. 82 – 87.
- Nunes, J.C. - “*Novos conceitos em vulcanologia: erupções, produtos e paisagens vulcânicas*”, Géonovas, No. 16, 2002, pp. 5-22.
- Nunes, J.C., Lima, E.A., Medeiros, S. – “*Carta de geossítios da Ilha Graciosa (Açores). Escala 1/50.000.* Geoparque Açores / Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 2009.

P

- Perneta, J.P.S - “*Caracterização Geológica E Geotécnica Dos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio Da Ilha Da Madeira.*”, Tese de mestrado, Universidade da Madeira, Funchal, 2013.

R

- Reis, C. – “*Processos Físicos para a Simulação de Movimentos Sísmicos Intensos para os Açores*”, Tese de mestrado, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2014.
- Rodrigues, J., Carvalho, A., Delfim, R., Gomes, R. – “*Leis de atenuação sísmica para Portugal Continental, considerando o tipo de terreno*”, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2014.

S

- Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. – “*SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites*”, Report No. EERC72-12, 1972.
- Serra, J.P.B., Caldeira, L.M.M.S – “*Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica*”, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, No. 81, 1997, pp. 51-63.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R.A. – “*Volcanic Ash Soils- Genesis, Properties and Utilization*”, Elsevier, 1994, 287 pp.
- Solnés, J. – “*Stochastic Processes and Random Vibrations: Theory and Practice*”, Wiley, 1997, 444pp.
- SSHAC – “*Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis. Guidance on uncertainty and use of experts*”, Report UCRL-ID-122160, Vol. 1, Lawrence Livermore National Laboratory, Report NUREG/CR-6372, Livermore, 1997, 280pp.

T

- Tavares, J., Furtado D. - “*Projecto-XV Expedição Científica Do Departamento de Biologia-São Jorge 2011.*”, Universidade dos Açores, 2011, 62 pp.
- Teves-Costa, P., Oliveira, C., Senos, M.L. – “*Danos em Angra do Heroísmo provocados pelo sismo de 1980. Correlação com a frequência do solo e edifícios*”, 6º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Guimarães, 2004.
- Teves-Costa, P., Veludo, I. – “*Soil characterization for seismic damage scenarios purposes: application to Angra do Heroísmo (Azores)*”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 11, Nº. 2, 2013, pp. 401-421.
- Toro, Gabriel R., Abrahamson, Norman A., Schneider, John, F – “*Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: Best estimates and uncertainties*”, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 41-57.

V

- Vanmarcke, E. H. – “*Structural response to earthquakes in seismic risk and engineering decisions*” Em: Lomnitz, C. and Rosenblueth, E. Editors, Elsevier Publishing Co., 1976, pp.287-337.
- Vilanova, S. P., Ferreira, M. A., & Oliveira, C. S. – “*PAD-1.0 Portuguese Accelerometer Database, CD_ROM Edition*”, Seismological Research Letters, Vol. 80, No. 5, 2009, pp. 839 – 844.
- Vucetic, M., Dobry, R. – “*Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response*”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, 1991, pp. 89-107.

W

- Wildner, W. – “*Caracterização geológica e geoquímica das sequências ultramáfica vulcano-sedimentares da região da Bossoroca, RS*”, Tese de mestrado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990, 169 pp

Anexos - A

Calibração da Rotina de Cálculo Automático “Geradados”

A.1 - Calibração da Rotina de Cálculo Automático “Gerados”

No processo de calibração da Rotina de Geração de Dados recorreu-se aos resultados obtidos no Simulador LNEC para o cenário constituído pela acção presente no EC8-95 para a AML com as seguintes apresentadas no Quadro A.1:

Quadro A.1 – Evento sísmico considerado

Magnitude	8.5
Coordenada Epicentro (X)	33.8896
Coordenada Epicentro (Y)	5.5255

Escolhendo-se de seguida uma freguesia, detendo-se então de valores de distância ao epicentro, duração da acção, tipo de solo e valores da acção para o local em questão, Quadro A.2.

Quadro A.2 – Tipo de solo considerado

Freguesia AML [DTCCFR]	101109
Distância Epicentro [Km]	253
Perfil Solo Considerado	B

Após a selecção introduziu-se os valores de magnitude, distância e tipo de perfil na rotina, sendo posteriormente comparados os resultados obtidos com os resultados provenientes do simulador, ambos para um amortecimento de 5%.

Para a comparação obteve-se o erro absoluto entre os valores da duração da acção, espectros de potência na base e à superfície, e espectros de deslocamento somente para a superfície, uma vez que na base a acção é pré-definida e igual para ambos os casos.

Quadro A.3 – Erro entre valores espectrais

Espectros	Erro Máximo
Potência – Substrato Rochoso	9.61E-02
Potência -Superfície	5.25E-02
Deslocamento - Superfície	4.60E-05
Aceleração - Superfície	3.00E-03

Quadro A.4 – Erro entre valores máximos

Valores Máximos	Erro Máximo
Duração	0.000
PGA [cm/s⁻²]	0.003
PGV [cm/s⁻¹]	0.0003
PGD [cm]	0.000

Contactou-se que o erro máximo, obtido entre valores, é inferior a 0.1 unidades, seja para os espectros seja para valores máximos indicando assim que a rotina elaborada se encontra devidamente calibrada pelo que é legítima a sua utilização para o fim que foi desenvolvida.

Anexos – B

Comparação dos Espectros de Resposta de Aceleração Obtidos pela Aplicação das Equações de Boore e Atkinson (2006) com os Obtidos Através das Equações deste Estudo

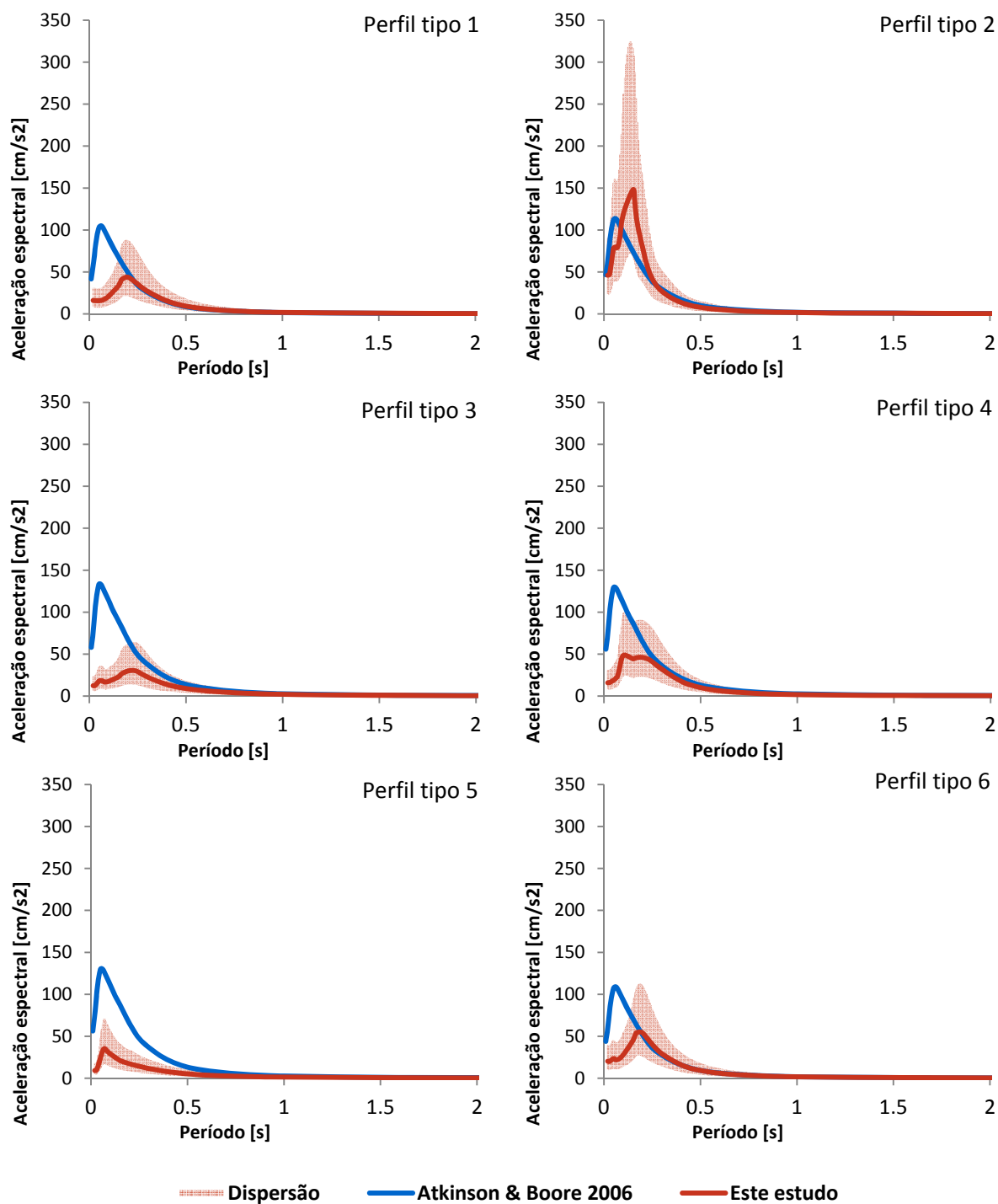


Figura B.1 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 4,1$, $R = 10$ km.

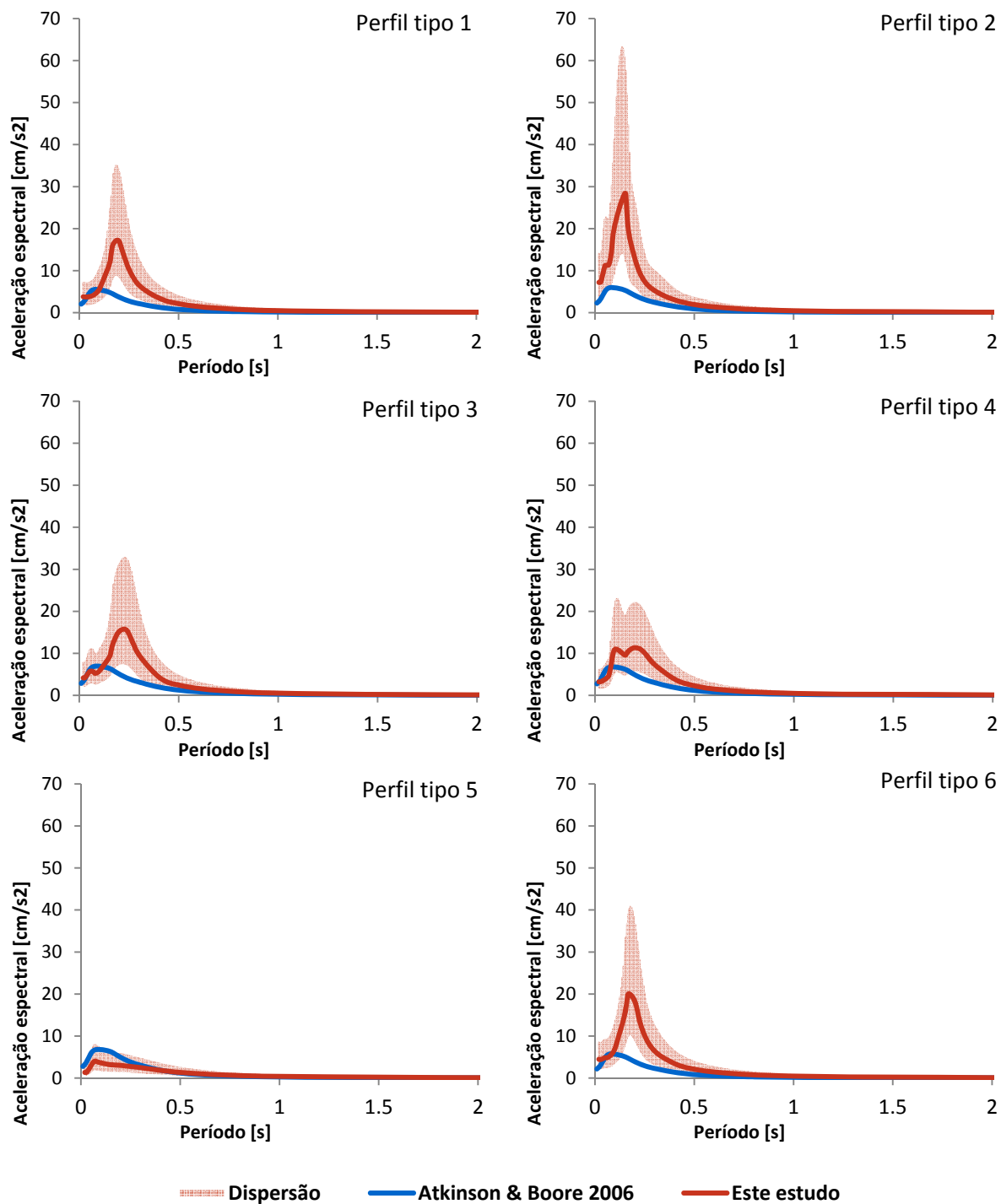


Figura B.2 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 4,1$, $R = 50$ km.

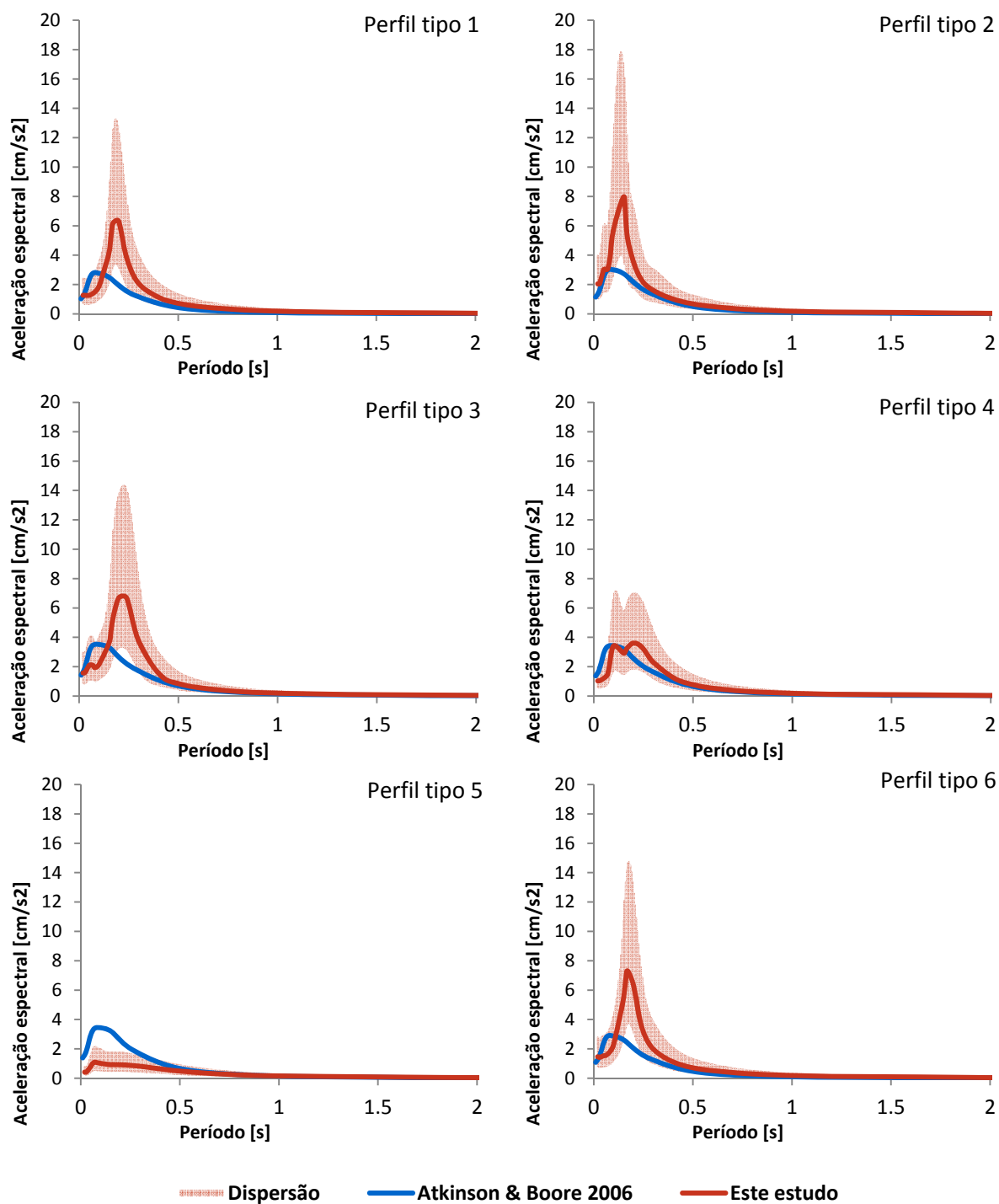


Figura B.3 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 4,1$, $R = 100$ km.

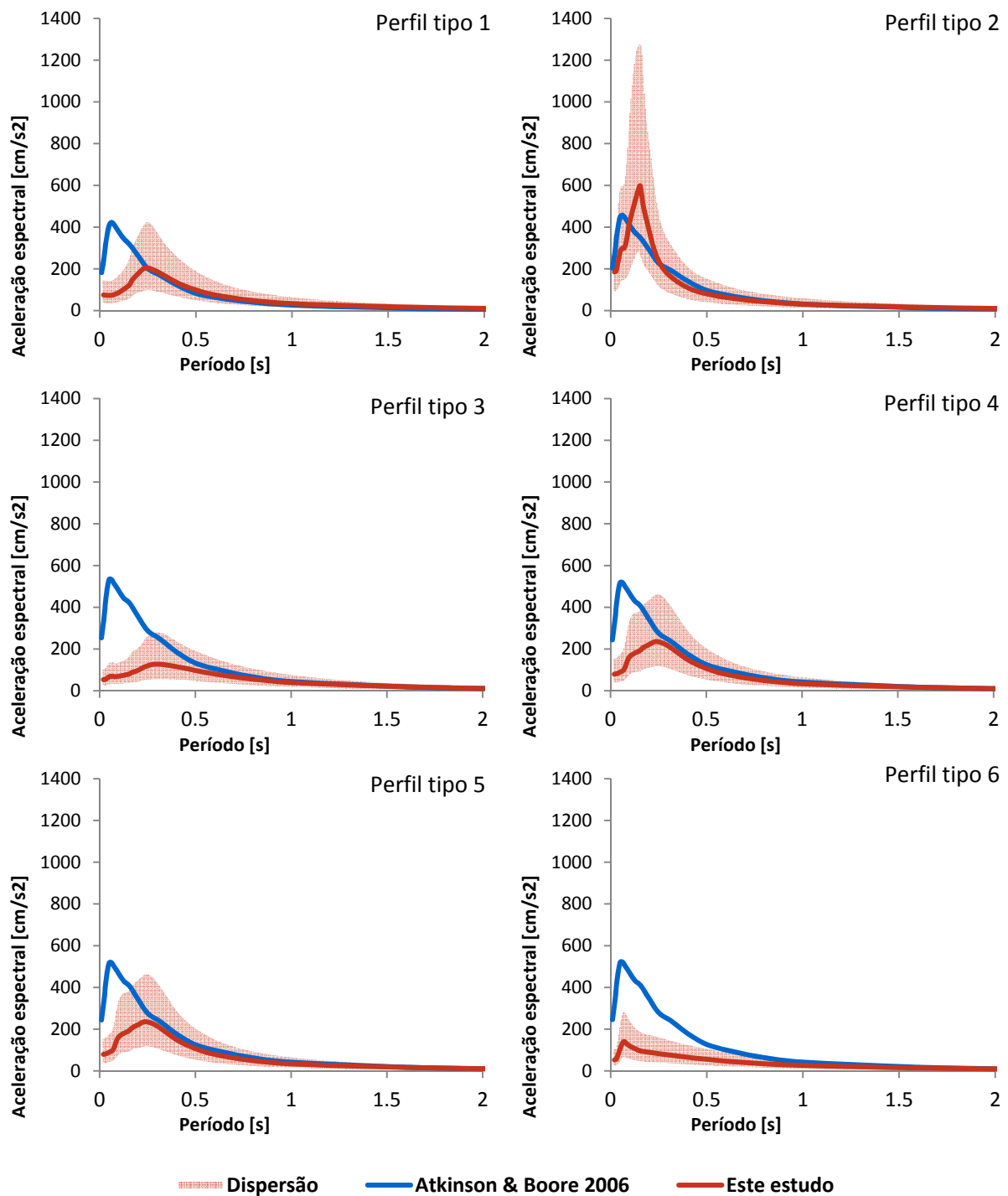


Figura B.4 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 5,3$, $R = 10$ km.

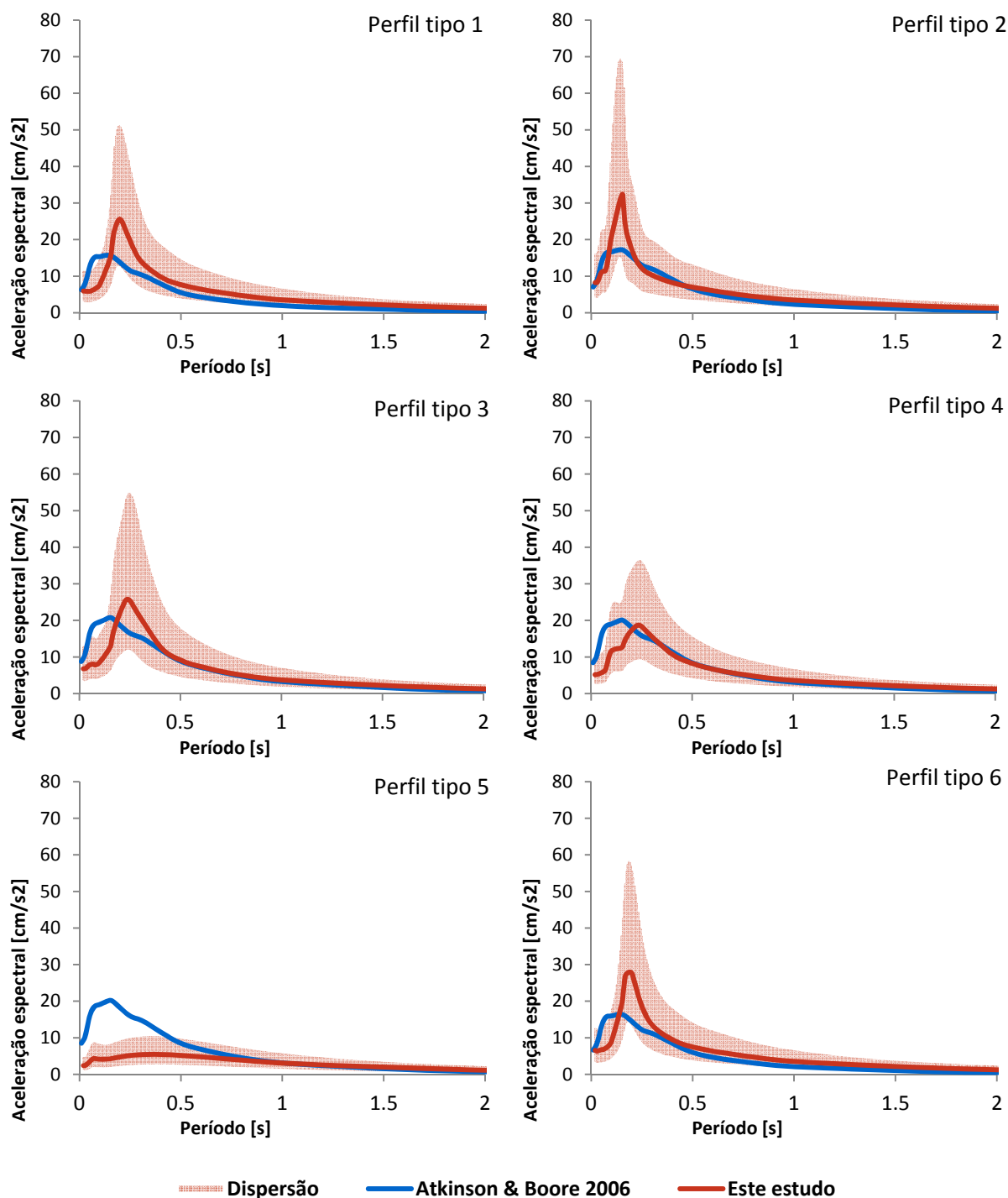


Figura B.5 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 5,3$, $R = 100\text{km}$.

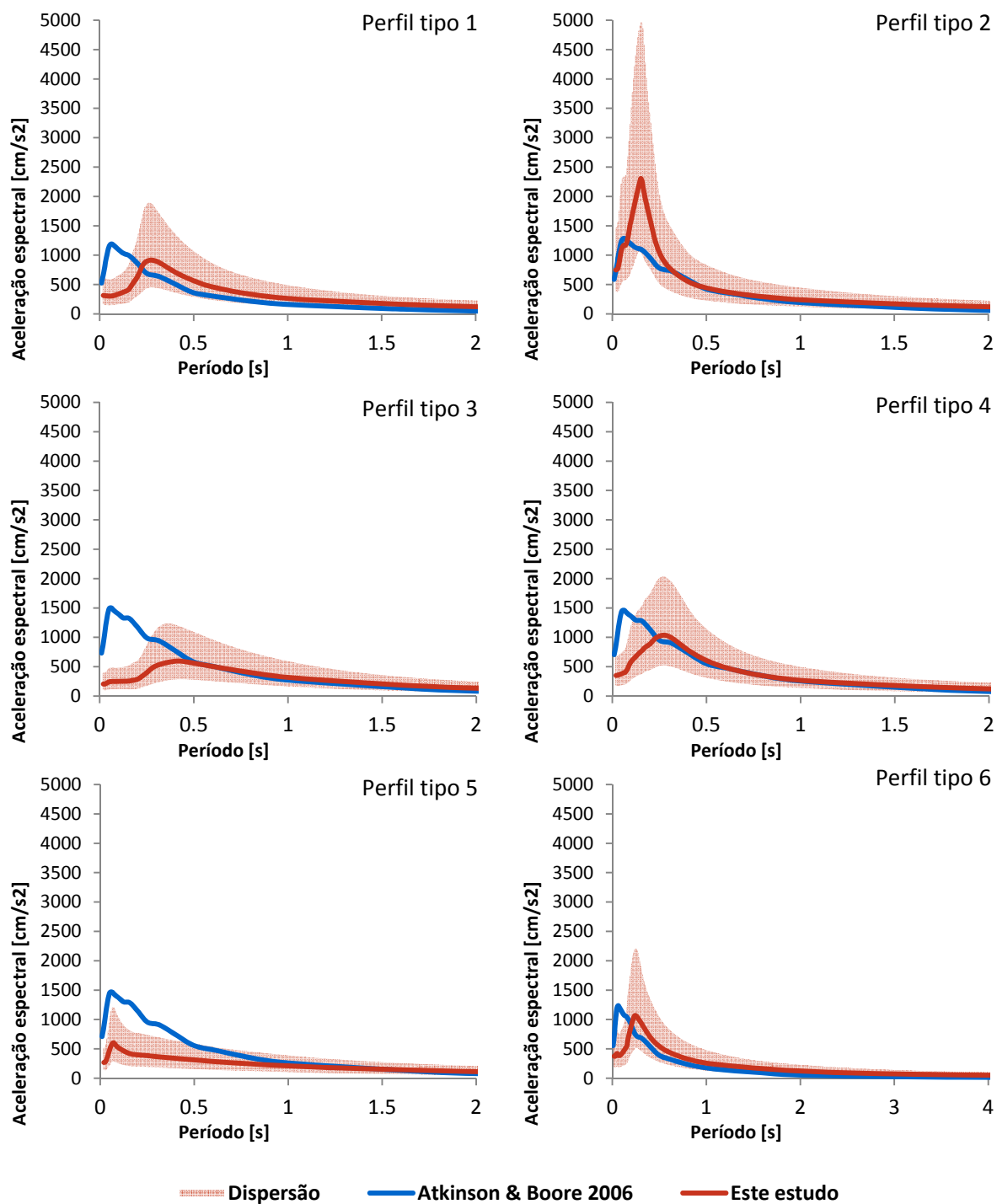


Figura B.6 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 6,5$, $R = 10\text{km}$.

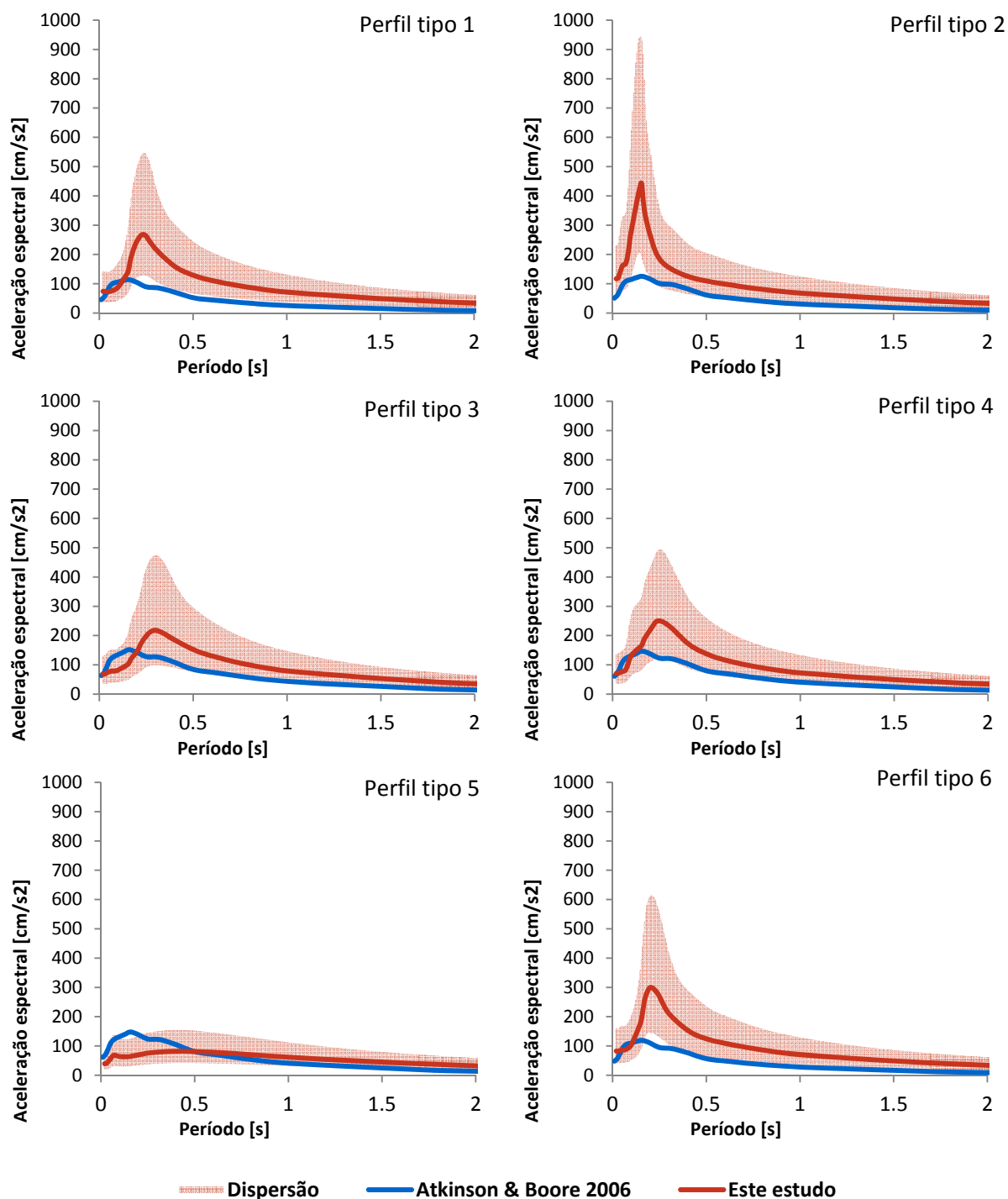


Figura B.7 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário $M_w = 6,5$, $R = 50\text{km}$.

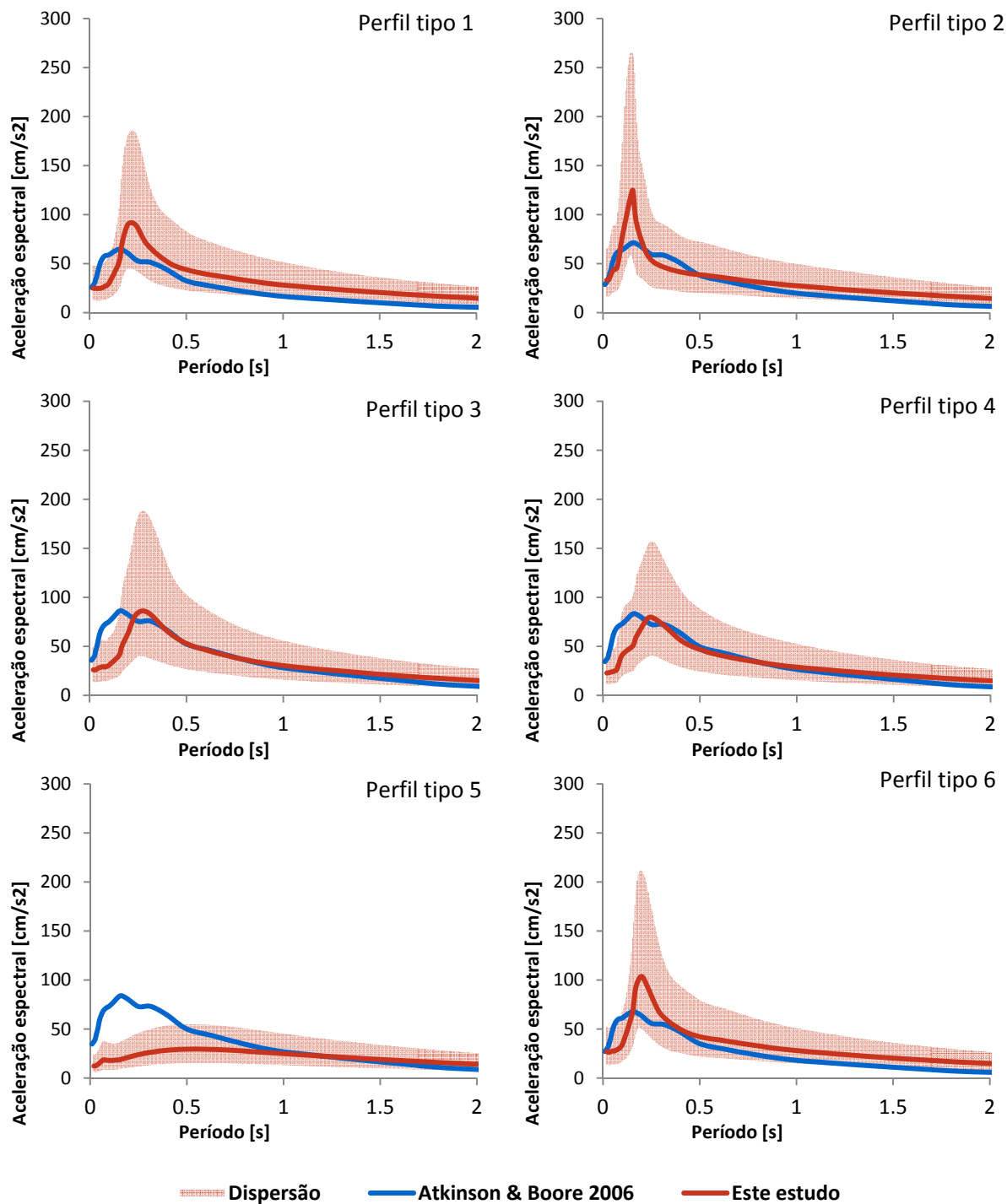


Figura B.8 – Comparação dos espectros de resposta de aceleração obtidos pela aplicação das equações de Boore e Atkinson (2006) com as equações obtidas neste estudo, para o cenário de $M_w = 6,5$, $R = 100\text{km}$.